

Superconductividad y superfluidez

La naturaleza oculta
de los fluidos cuánticos



Un paseo por el
COSMOS

EX LIBRIS Scan Digit

Superconductividad y superfluidez

La naturaleza oculta
de los fluidos cuánticos



The Doctor y La Comunidad

Redigirización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoreau.blogspot.com/>

RBA

Imagen de cubierta: Fotografía de un torbellino formado en el agua. Estructuras muy similares a esta aparecen en la explicación cuántica de la superfluidez.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Bruno Julià Díaz y Fernando Fernández Belmonte por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: ArSciMed/Age Fotostock: 78; Cantabria tradicional/Age Fotostock: 43a; Casey Reed/Penn State University: 123b; Emilio Segrè Visual Archives: 52; Grupo de Jean Dalibard: 67; Gustavo Espino Ordóñez: 29; IBM: 117b; Jeremy Walker/Getty Images: 87a; Julien Garcia/Age Fotostock: 87b; Kevin Foy/Age Fotostock: 147; NASA: 19a; Science Photo Library/Age Fotostock: 117a; Selim Jochim: 74; Shutterstock: Portada, 19b; Simon Swordy (U. de Chicago)/NASA: 54; Toshiba: 150; Volker Steger/Age Fotostock: 135; Wikipedia/NASA: 123a; Wikipedia/Wikimedia Commons: 41, 77, 98, 111, 113, 151; Yoav Levy/Age Fotostock: 43b.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-9089-2
Depósito legal: B-22064-2017

Impreso y encuadrado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)
Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	Superconductividad. La caída de la resistencia 13
CAPÍTULO 2	Fluidos y superfluidos 35
CAPÍTULO 3	Bosones condensados y electrones apareados 59
CAPÍTULO 4	Estados cuánticos en el mundo bidimensional 81
CAPÍTULO 5	Superfluidez y superconductividad en el universo 105
CAPÍTULO 6	Lo que el futuro nos depara 131
LECTURAS RECOMENDADAS	153
ÍNDICE	155

INTRODUCCIÓN

La historia de la ciencia discurre apaciblemente hasta que se producen hitos fabulosos que trastocan nuestro entendimiento y de los que, con suerte, aprendemos y seguimos avanzando. En este breve libro hablaremos de al menos cuatro de estos «momentos estelares de la ciencia», parafraseando al escritor austriaco Stefan Zweig. El primero data de 1911 y es el experimento fantástico y revolucionario realizado por el físico neerlandés Heike Kamerlingh Onnes, basado en la superconductividad del mercurio a temperaturas cercanas al cero absoluto. El segundo, el descubrimiento de la superfluidez acometido en 1937 por un lado por el físico soviético Pyotr Kapitsa y, por otro, por dos colegas canadienses, John F. Allen y Don Misener. El tercero es, sin duda, la interpretación de la superfluidez como una consecuencia de un fenómeno predicho por el científico indio Satyendra Nath Bose y el célebre físico alemán Albert Einstein años antes, un estado de la materia conocido como *condensado de Bose-Einstein*. El cuarto y último, fue la increíble solución propuesta por los estadounidenses John Bardeen, Leon N. Cooper y John R. Schrieffer al fenómeno de la superconductividad observado por Kamerlingh Onnes.

Curiosamente, fenómenos en apariencia dispares como son la corriente eléctrica o el flujo de agua en un río tienen en realidad mucho en común. En ambos casos se trata de fluidos, un estado de la materia en la que los constituyentes, electrones en un caso, moléculas de agua en el otro, no están ni tan ordenados ni sometidos a una disciplina tan marcial como en los sólidos, pero tampoco gozan de la aparente anarquía y libertad de los gases. En los fluidos, la interacción entre los entes microscópicos que los forman es relevante. Entre ellos se forman pequeños grupos y parejas, cuyo comportamiento colectivo es, en ocasiones, completamente distinto del que tendrían cada uno por su cuenta. Entonces, si la corriente eléctrica y la de un río son en realidad tan parecidas, no es tan extraño que la superconductividad y la superfluidez sean, de alguna manera, las dos caras de la misma moneda. Ambos fenómenos se corresponden con fluidos que discurren sin verse frenados por ningún obstáculo. En el primero desaparece el rozamiento de los electrones al corretear por los cables conductores, lo que normalmente llamamos la *resistencia eléctrica*. En el segundo, lo que se desvanece es la fricción del fluido consigo mismo, que es la que provoca que, cuando desplazamos agua con una pala, no solo movamos una capa superficial, sino que todo el fluido se vea de alguna manera perturbado. Como veremos, tanto la superfluidez como la superconductividad se manifiestan en casos peculiares en los que la temperatura es tan baja que las propiedades cuánticas de la materia rigen su comportamiento. La mayor diferencia entre ambas es que en la superconductividad lo que se mueven son cargas eléctricas mientras que en la superfluidez son partículas neutras, sin carga.

Comenzaremos el viaje repasando los conceptos clásicos de conductor eléctrico y fluido para rápidamente pasar a describir los descubrimientos que dejaron en estado de *shock* a la comunidad científica durante décadas. Así, hablaremos del laboratorio del profesor Kamerlingh Onnes de Leiden, de cómo licuó el helio y, de paso, de cómo descubrió casi por casualidad el fenómeno de la denominada superconductividad de Tipo I. Todo esto ocurrió hace ahora más de un siglo. Despues nos introduciremos de lleno en el

fenómeno de la superfluidez, descubierta con cierta controversia por Pyotr Kapitsa y John F. Allen y Donald Misener, que mostraron cómo la forma de fluir y de comportarse del propio helio cambiaba completamente cuando se acercaba al cero absoluto de temperatura, lo que corresponde, aproximadamente, a unos -273°C .

Las razones por las cuales algunos metales pasaban a ser superconductores por debajo de una temperatura crítica no se conocieron hasta pasados cuarenta años desde el descubrimiento inicial de Kamerlingh Onnes. Nada menos que cuatro décadas durante las cuales un fenómeno de primera magnitud observado y bien caracterizado tuvo que aguardar a que las mentes más privilegiadas entendieran su naturaleza. Todos sabían que la física cuántica, desarrollada con gran éxito para explicar el funcionamiento del átomo, debía contener la explicación a este fenómeno que resultaba tan elusivo a cuantos intentaban resolverlo.

Con la superfluidez el proceso fue algo más rápido. En el mismo año de su descubrimiento el físico estadounidense de origen alemán Fritz London relacionó, con acierto, el fenómeno de la superfluidez con la condensación de Bose-Einstein. Este fenómeno se producía cuando las partículas bosónicas —y los átomos de He 4 lo son—, se enfriaban a tan baja temperatura que todas se condensaban en el mismo estado cuántico, comportándose casi como si fuesen una sola, gigantesca y macroscópica partícula. Este fenómeno colectivo cuántico, que describiremos más adelante con detalle, está ciertamente en la raíz de la superfluidez.

Como veremos, la explicación cuántica de la superconductividad de muy baja temperatura la dieron John Bardeen, Leon Cooper y John Schrieffer. Su teoría conecta de alguna manera con la condensación de Bose-Einstein. Podríamos resumirlo así: cuando los electrones del metal están a temperaturas realmente bajas, prefieren unirse formando parejas que, en lugar de comportarse como fermiones, lo hacen como bosones. Al *bosonizarse* una parte del gas de electrones, el comportamiento colectivo de los mismos varía, y el metal cambia completamente sus propiedades, apareciendo el fenómeno de la superconductividad. Aprovecharemos la coyuntura para asomarnos a la vida de John Bardeen, el único físico con dos premios Nobel de Física, y ve-

remos con algo más de detalle cómo fue capaz de explicar la superconductividad, unos años después de haber descubierto nada menos que el transistor.

El comportamiento cuántico de la materia es, pues, la clave de estos dos fenómenos en apariencia dispares. Por ello nos adentraremos también en fenómenos cuánticos de naturaleza parecida, en los que el comportamiento colectivo de los constituyentes hace que aparezcan fenómenos sorprendentes. Hablaremos de los sistemas bidimensionales comenzando por el bien conocido efecto *Hall* y su no tan consabida versión cuántica. Veremos que los efectos Hall cuánticos en los que la conductividad del material se comporta de una forma completamente anómala también consiguen explicarse mediante la física cuántica y el comportamiento colectivo.

Los materiales superconductores y superfluidos o, más en general, los líquidos cuánticos, juegan hoy día un papel muy relevante tanto desde el punto de vista puramente de ciencia básica como en múltiples desarrollos tecnológicos. Repasaremos, al final de nuestro viaje, tres lugares del universo donde estos aparecen. En primer lugar nos asomaremos al mundo de los futuros computadores cuánticos, construidos mediante qubits superconductores. Esta tecnología se está desarrollando mientras escribimos este libro y parece que será por la que apostarán una gran mayoría de laboratorios y empresas. Hablaremos también de los laboratorios de átomos ultrafríos en los que se produjeron hace veinte años los primeros condensados de Bose-Einstein y en los que hoy se estudian las raíces microscópicas de los fenómenos de la superconductividad y la superfluidez. En estos laboratorios se preparan nuevos superfluidos a la carta y se generan formas de convertir aislantes en superfluidos jugando con las propiedades de la materia. El tercer ejemplo es más exótico, se trata de uno de los pocos lugares del universo en los que se cree que los fluidos cuánticos campan a sus anchas: las estrellas de neutrones. Hablaremos de estos objetos fabulosos con tamaños de decenas de kilómetros y masas mayores a la del Sol. Se cree que en ellos algunos neutrones fluyen sin viscosidad aparente.

Para terminar, nos aventuraremos a describir los que quizás sean los descubrimientos del futuro. Ciertamente, si somos capaces de prever cuáles serán, quizás es que estos no serán tan sorprendentes, pero en cualquier caso repasaremos algunos de los frentes actuales, más o menos especulativos. Concretamente, los supersólidos, la naturaleza misma del vacío, los superfluidos de alta temperatura, los superconductores de alta presión y algunas aplicaciones más o menos pintorescas de futuros superconductores.

No nos queda más que desecharle al lector que disfrute con las aventuras físicas y conceptuales que le presentamos a continuación. Todas ellas son fruto del trabajo arduo y la dedicación sin fin de muchos científicos de todos los rincones del globo, pero también el producto de cierta fortuna que, a veces, aparece disfrazada de oportunidad o casualidad que, quizás, es la forma que tiene la naturaleza de abrirmos una ventana minúscula a sus más recónditos secretos.

Superconductividad. La caída de la resistencia

Un flujo de electrones alimenta nuestra hiperconectada civilización actual. En su camino a través de los cables, la mayor dificultad que encuentran es la resistencia eléctrica. Pero, bajo condiciones extremas, la mecánica cuántica puede ayudarlos a fluir sin obstáculos. Eso es la superconductividad.

La electricidad es, desde hace ya casi doscientos años, un elemento perfectamente cotidiano. Es difícil imaginar en el siglo xxi cómo sería nuestra vida sin tantísimos artilugios cuyo funcionamiento depende completamente de la electricidad. Tanto el teléfono móvil como el frigorífico, pasando por la lavadora, la televisión o el ordenador, entre otros muchos, serían simples objetos inertes sin ningún interés si no fuera por el movimiento ordenado de los electrones. La dependencia que tenemos de la electricidad la sitúa casi al nivel del agua potable, elementos sin los cuales no sobreviviríamos ni dos días, como se aprecia en el hecho de que, en el mundo desarrollado (ver paisaje nocturno de Europa en la imagen superior de la página 19), en cada casa tengamos ambas fuentes primordiales. Evidentemente, el papel de la electricidad no se ciñe solo al ámbito del hogar; toda la civilización moderna y su gran interconectividad son hoy posibles gracias a ella. Comencemos, pues, este relato describiendo succinctamente en qué consiste este conjunto de fenómenos físicos esenciales para nuestro *modus vivendi*.

Aunque es una imagen un poco tosca, podemos entender la corriente eléctrica como un río de electrones que se mueve en-

tre dos puntos a distinto nivel, cayendo libremente de un punto a otro, siguiendo un cauce. En esta analogía, el caudal de dicho río representa lo que llamamos *intensidad de corriente*, mientras que el desnivel sería la *diferencia de potencial eléctrico*. Pero ¿de qué depende que el caudal sea mayor o menor? Depende, desde

luego, de esa diferencia de nivel, pero también de las características del lecho del río, de su longitud, de su anchura... Si el lecho es rugoso, el cauce estrecho y el camino largo, entonces la corriente bajará tortuosamente de un punto a otro. Si el lecho es rugoso, el cauce ancho y el camino largo, entonces

la corriente bajará relativamente despacio. Si por el contrario, el fondo es liso, el camino corto y el cauce estrecho, el agua del río bajará a gran velocidad. El conjunto de las características que determinan el caudal sería lo que llamamos *resistencia*. Nótese que al describir la naturaleza aparecen dos tipos de propiedades: las intensivas, que son aquellas que no dependen del tamaño o la masa del objeto, como la temperatura o el olor de una sustancia, y las extensivas, como son, por ejemplo, el volumen o la masa.

Siguiendo esta analogía vemos que la resistencia depende de dos magnitudes extensivas, la longitud y la anchura del cauce, y de una intensiva, la rugosidad del lecho, que es una propiedad del medio en el que se mueven los electrones denominada *resistividad*. Cuando esta es muy alta los electrones tienen más dificultad para transitar por el lecho haciendo que la intensidad de corriente sea pequeña. En cambio, cuando es muy baja —imaginemos un lecho suave y pulido— la intensidad de corriente será mayor.

Casi siempre, sin embargo, hablaremos de la *conductividad*, que no es otra cosa que el inverso de la resistividad, porque hace más directo el razonamiento: si la conductividad es alta, la intensidad de corriente es alta; y si la conductividad es baja, la intensidad de corriente será baja. Es exactamente lo mismo que hemos escrito antes, pero expresado de otra manera.

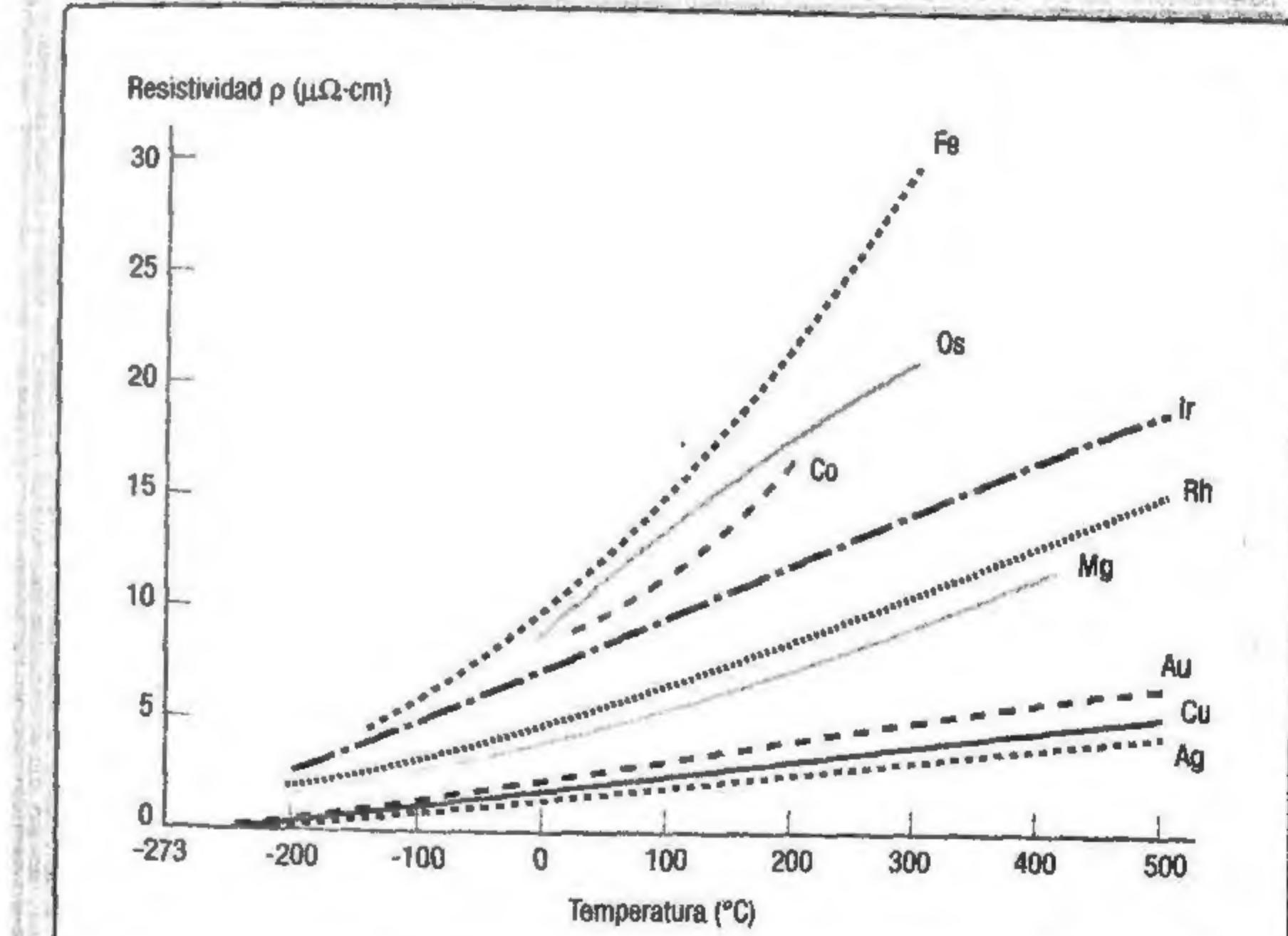
Ahora reflexionemos un instante. ¿Es mejor tener una conductividad alta o una conductividad baja? ¿Mucha o poca intensidad

La belleza de la electricidad [...] es que funciona de acuerdo a una ley y un intelecto formado puede gobernarla en gran medida.

MICHAEL FARADAY

LA RESISTIVIDAD DE LOS METALES

La resistividad de los conductores aumenta de forma notable cuando subimos su temperatura (ver figura). Vemos, por ejemplo, que la resistividad del cobre (Cu) se triplica cuando pasamos de 0 a 500 °C. No parece un aumento desmesurado pero en un circuito la energía desperdiciada en forma de calor —debido al efecto Joule— es directamente proporcional a esta magnitud, de modo que cualquier aumento es importante. En el caso del hierro (Fe), un conductor mediocre, podemos observar que la importancia de la temperatura es incluso mayor: podemos triplicar su resistividad aumentando su temperatura tan solo 300 °C. A la hora de usar uno u otro conductor tenemos en cuenta estas propiedades: el cobre se comportará mucho mejor para conducir la electricidad mientras que el hierro podrá usarse para construir radiadores que aprovechen toda esa energía que derrocha cuando lo atraviesa una corriente. Aunque, por supuesto, jamás debemos alcanzar temperaturas que fundan los materiales que empleamos ya que, en ese caso, el material derretido fluiría sin control, averiando cualquier mecanismo. Recordemos que las temperaturas de fusión de los elementos de la tabla periódica no son tan altas: la mayoría de metales, cuando son calentados mientras se someten a una presión de una atmósfera, se licúan antes de alcanzar los 2000 °C.

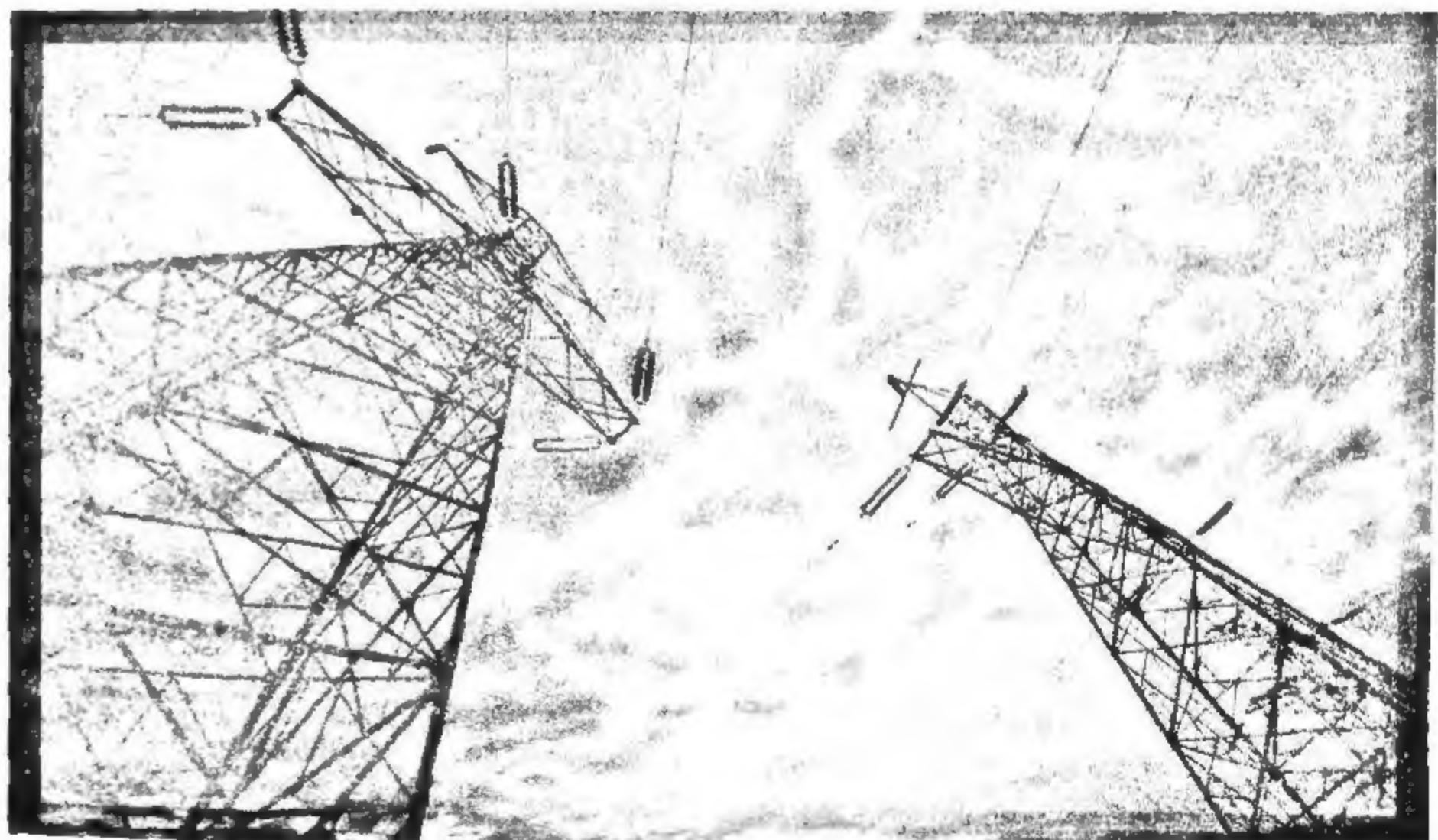
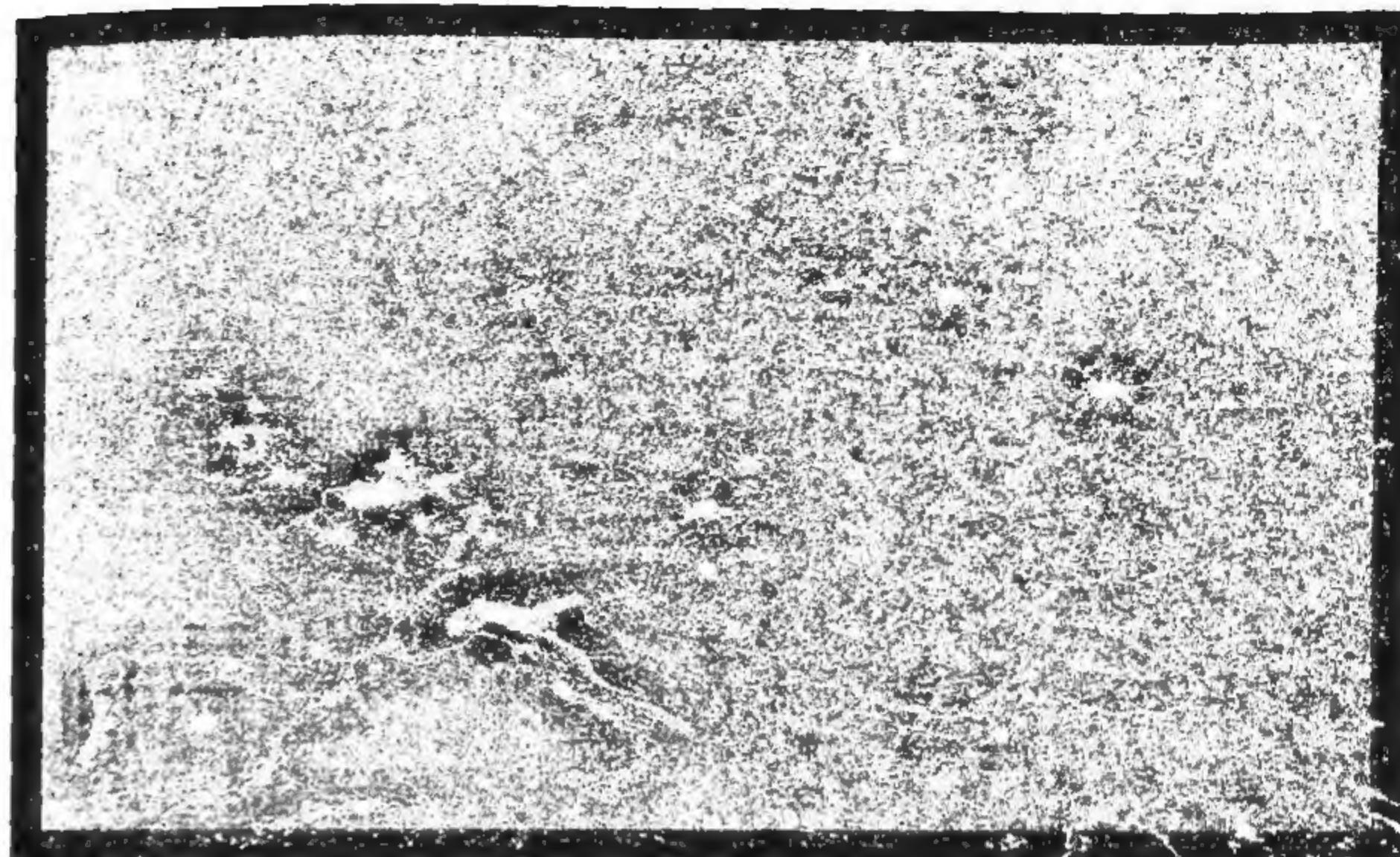


de corriente? Pues dependerá de para qué vayamos a utilizar la electricidad. Como ocurre con el ejemplo del río, a veces nos convendrá tener un torrente, que nos proporciona energía eléctrica gracias a las turbinas, y otras muchas será mejor tener un embalse que, entre otras cosas, nos permite almacenar agua y energía.

LA ELECTRICIDAD, LA RESISTENCIA Y EL EFECTO JOULE

La electricidad es un fenómeno cotidiano para todos nosotros, está presente en los rayos que observamos fascinados durante una tormenta (ver imagen inferior en página contigua) y, además, una gran cantidad de nuestros utensilios y aparatos cotidianos la utilizan en su día a día, lo que resulta muy útil a la hora de explicar sus principales propiedades. Comenzaremos refiriéndonos a un viejo calefactor de los que aún pueden encontrarse en las casas de nuestros abuelos. Es un aparato sencillo, cuyo diseño básico apenas consta de un interruptor y una o varias varillas metálicas que se ponen al rojo vivo cuando pasa por ellas la corriente eléctrica. El proceso es bien conocido: cuando los electrones atraviesan un conductor no lo hacen limpiamente sino que colisionan con sus átomos, frenándose y dejando parte de su energía en el material. Dicha energía aumenta la temperatura del medio y este, a su vez, calentará el aire de su alrededor. Este efecto es muy parecido al calentamiento que se produce cuando frotamos dos superficies, una contra la otra, o incluso nuestras propias manos. El que a nivel microscópico haya una cierta rugosidad es lo que hace que se produzca rozamiento, lo que, a su vez, consigue transformar la energía del movimiento en calor, aumentando la temperatura de las manos. En el caso de las manos nos sirve para calentarnos, pero en otros muchos casos el mismo efecto está en la raíz de graves problemas. Por ejemplo, el calor producido por el rozamiento hace que se desgasten los neumáticos o que se acaben quemando piezas plásticas incorporadas en engranajes mecánicos.

El mismo efecto que hace que funcionen los calentadores tiene lugar en las bombillas incandescentes que, hasta hace bien



Arriba, montaje fotográfico realizado con casi 10 000 imágenes nocturnas del continente europeo, en el que se aprecia la alta luminosidad de las principales ciudades. Abajo, la electricidad, muy presente en la naturaleza, discurre por los cables hasta nuestros hogares.

poco, poblaban nuestro hogares. Observando su interior encontramos un fino hilo que, cuando encendemos el interruptor, se pone casi inmediatamente al rojo blanco, emitiendo luz y, sobre todo, calor a su alrededor. Las diferencias más importantes entre el viejo calentador y la bombilla son las características precisas del material conductor, como son su longitud, su grosor y su conductividad, pero también su punto de fusión. En una bombilla es primordial que el material aguante la mayor temperatura posible sin fundirse ni quemarse.

Pues bien, este proceso tan familiar ocurre continuamente a menor escala en absolutamente todos los aparatos electrónicos que utilizamos en nuestra vida cotidiana. El teléfono móvil, el televisor, el frigorífico, la lavadora, el ordenador portátil y un largo etcétera. Todos contienen pequeños elementos que se están calentando —casi siempre de forma indeseada—, desperdiciando parte de la preciosa energía que queremos emplear en otros menesteres. En algunos casos, el calentamiento es tan importante que hace que necesitemos enfriar continuamente los materiales, como ocurre con el ordenador, que suele tener un ventilador acoplado para mantener el procesador a una temperatura razonable a pesar del calentamiento producido por los electrones al circular.

Hay muchas ocasiones en las que nos gustaría que la resistencia al paso de la corriente desapareciera. Sin embargo, la naturaleza no solo no suele concedernos lo que deseamos sino que muchas veces juega en nuestra contra. Imaginemos el típico hilo de cobre que usamos para transportar electricidad de un punto a otro. ¿Acaso su oposición al paso de electrones es una propiedad inmutable y constante del material? ¡Ni por asomo!

Ya hemos visto que un conductor se calienta cuando transporta una corriente eléctrica. Esto significa que las partículas que componen el material ganan energía y vibran cada vez más erráticamente en torno a sus posiciones habituales, dejando menos espacio libre para el paso de los electrones, lo que los ralentizará. Es decir, que cuanto mayor sea la resistencia de un material tanto más aumentará su temperatura lo que, a su vez, producirá un aumento de la resistencia.

La consecuencia inmediata de este proceso de retroalimentación es obvia: hasta el metal más resistente puede llegar a fundirse si se permite que se caliente sin límite. Y esto, desde luego, interrumpirá por completo el paso de corriente. De nada nos sirve tener un excelente conductor si dejamos que se convierta en un charco de metal viscoso. Pero no es este el único resultado posible. Si nuestro conductor se calienta, parte del calor pasará a las estructuras que lo rodean, pudiendo por ejemplo quemar los materiales plásticos e inducir reacciones químicas diversas que bien podrían liberar gases tóxicos.

Por este motivo los circuitos delicados se deben mantener siempre bien ventilados o incluso refrigerados. La temperatura nunca debe subir sin control. Este efecto, del que otras veces sacamos provecho, como en la bombilla o el calefactor, puede ser terriblemente dañino para los electrodomésticos si no los diseñamos correctamente. Todo esto es muy interesante pero ¿qué ocurre cuando, en lugar de calentar un conductor, lo enfriamos?»

Ya hemos explicado que al subir la temperatura la resistencia aumenta, por lo que es de esperar que lo contrario también sea cierto: si bajamos la temperatura la resistencia deberá bajar también. ¡Los conductores son tanto mejores cuanto más fríos están!

Pero ¿cuánto aumentará la conductividad al bajar la temperatura? ¿Subirá lentamente hasta alcanzar algún valor determinado? ¿Crecerá exponencialmente? ¿Mantendrá siempre el mismo ritmo de variación? ¿Alcanzará algún valor máximo y luego bajará de nuevo? ¿Es acaso la conductividad una función discontinua de la temperatura? ¿Y si los electrones se detuvieran al llegar al cero absoluto y se anulara la conductividad? Aunque *a priori* las posibilidades son infinitas, en ciencia suele apostarse por el comportamiento más sencillo posible.

En cualquier caso, la única forma de salir de dudas es ir al laboratorio, medir el valor de la resistencia de distintos metales a diferentes temperaturas y ver qué ocurre. ¡No sería maravilloso que, al bajar de 20 °C a 10 °C, de repente los electrones atravesaran los cables de cobre al doble de velocidad? Si así fuera, con un sencillo mecanismo de refrigeración lograríamos multiplicar

LA ESCALA ABSOLUTA DE TEMPERATURAS

Aunque en el día a día estamos acostumbrados a medir la temperatura usando los grados centígrados de la escala Celsius, es la escala Kelvin de temperaturas absolutas la que se usa más ampliamente en física. Esta elección no es, como podría parecer, un capricho matemático. Vamos a ver por qué. Para empezar debemos recordar que la escala Celsius define la temperatura como un parámetro que, a una presión de una atmósfera, vale cero en el punto de congelación del agua y cien en su punto de ebullición. Es una definición operacional de esta magnitud. No nos dice qué es sino solo nos da un método para medirla. La escala centígrada, aunque corriente, nos escatima el sentido de lo que estamos midiendo. Es una escala «vacía». La temperatura absoluta, sin embargo, sí tiene sentido físico. Mediante el estudio de los gases ideales se llegó a la conclusión de que es una magnitud proporcional a la energía cinética media de las partículas que constituyen un sistema. Lo que es lo mismo que decir que la temperatura es, de facto, la energía cinética media de las partículas de un sistema. Si estas partículas se mueven frenéticamente es porque están a una temperatura alta. Si no lo hacen apenas es porque nos estamos acercando al cero absoluto de temperatura, que es ese límite donde todo movimiento microscópico se detiene.

Echando mano de la constante de Boltzmann

Es interesante añadir que existe una constante, la de Boltzmann (K_B) (por su autor, el físico austriaco Ludwig E. Boltzmann), que nos permite pasar de la unidad absoluta de temperatura, el kelvin, a la unidad de energía del Sistema Internacional, el julio. Esto es, si conocemos la temperatura de un sistema (ya sea un gas diatómico, un fluido o una red cristalina), la energía cinética media de sus partículas componentes será del orden de $K_B \cdot T$. En particular, la de un gas monoatómico en un espacio tridimensional se escribirá: $E_c = 3/2 \cdot K_B \cdot T$. Pocos resultados expresan tanto de forma tan sencilla y elegante. Además de lo anterior, la temperatura absoluta también aparece de forma natural en otros sistemas más complejos donde no es tan sencillo visualizar que haya moléculas moviéndose. Imaginemos, por ejemplo, que tenemos un sistema donde las partículas solo pueden acceder a dos niveles de energía, E_1 y E_2 . En este caso habrá partículas en ambos niveles. Si la temperatura (medida ya en julios), está cerca de E_1 , entonces habrá muchas más partículas en el nivel inferior que en el superior. Si ocurre lo contrario, entonces habrá muchas más partículas en el nivel superior. Matemáticamente puede calcularse el número de partículas que habrá en cada uno de dichos niveles y, también, cuál es la probabilidad de que una partícula salte del nivel bajo al superior, que será tanto mayor cuanto más alta sea la temperatura, pues esto significa que más partículas tienen energía suficiente para vencer la diferencia de energías, como muestra la figura 1.

Intercambio térmico entre focos calientes y fríos

Otro ejemplo más de la importancia de la temperatura absoluta lo encontramos en los estudios del físico e ingeniero francés Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) sobre máquinas térmicas. Vamos a verlo con un ejemplo. Supongamos que queremos obtener energía de un «foco caliente», por ejemplo un volcán, una estrella o una tubería con vapor en ebullición.

Para ello necesitaremos poner junto al foco caliente un foco frío, como un río, un lago, el mar o la atmósfera, de tal modo que se establezca un flujo de calor entre ambas. Este flujo continuará siempre que no lo interrumpamos del todo y mientras los focos no igualen su temperatura. Nuestra máquina térmica será un artefacto que robará parte de este flujo de calor y será tanto más eficiente cuanto más energía obtenga a partir de dicho flujo. En cierto modo, el funcionamiento es el mismo que el de una turbina en una presa: queremos que la turbina gire lo máximo posible, pero sin que el nivel del río suba demasiado. Pues bien, lo que demostró Carnot en el siglo XIX es que, en el caso más favorable, el flujo de calor es proporcional a la temperatura del foco caliente, mientras que la energía que obtenemos es proporcional a la diferencia de temperaturas de los focos.

El límite lo marca Carnot

Por tanto, la eficiencia máxima de nuestra máquina térmica, que no es sino un generador, depende única y exclusivamente de las temperaturas absolutas de los focos entre los que trabaja. ¡Y no depende de nada más! Aunque mejorásemos el montaje, el diseño o los materiales de construcción, aunque viajásemos un millón de años en el futuro, la eficiencia de nuestra máquina jamás podría superar el límite que nos marcó Carnot. Lo que no deja de ser sorprendente y que nos da una idea de lo potente que es la termodinámica, cuya eficiencia se refleja en la figura 2.

FIG. 1

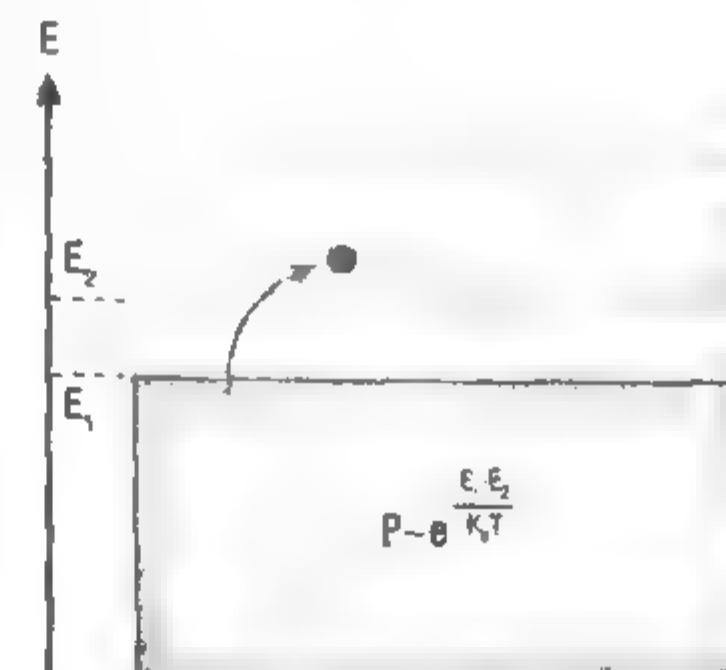
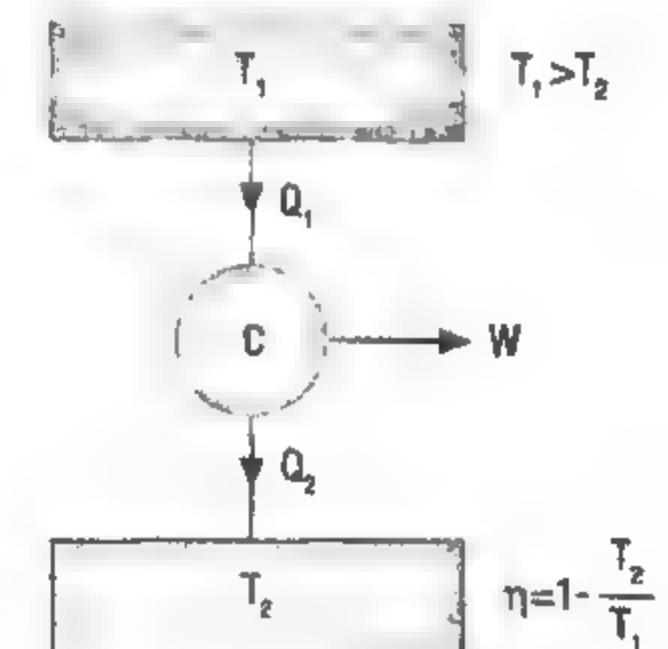


FIG. 2



A la izquierda, la probabilidad (P) que una partícula pase al nivel superior de energía puede calcularse matemáticamente. A la derecha se muestra la eficiencia (η) de una máquina de Carnot entre dos temperaturas.

la intensidad de corriente y bajar espectacularmente las pérdidas de potencia debidas al calentamiento de los conductores. Desafortunadamente, los resultados no son tan espectaculares: la triste realidad es que en los materiales que usamos más frecuentemente en electrónica (cobre, plata o hierro, por ejemplo) es necesario bajar la temperatura cien o doscientos grados Celsius para ver caer suavemente su resistencia a la mitad.

Pero ¿qué ocurre con otros conductores menos habituales? Podría ocurrir, por ejemplo, que el cobre fuese mejor conductor que el plomo a alta temperatura, pero que eso dejase de ser cierto si se enfriases los materiales lo suficiente. En ese caso, quizás nos convendría usar cables de plomo y enfriar lo suficiente los circuitos. Parece una locura y una complicación innecesaria pero podría haber casos en los que resultase rentable hacerlo. En cualquier caso, el problema era suficientemente interesante para estudiarlo y, por ello, el físico neerlandés Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926), que tenía un laboratorio dedicado a estudiar la física de bajas temperaturas, decidió ponerse a ello en la segunda década del siglo XX.

Retrocedamos en el tiempo y repasemos un poco la historia. Kamerlingh Onnes, interesado en estudiar las propiedades termodinámicas de líquidos y gases cerca del cero absoluto, fundó en 1894 un centro de investigación criogénica en Leiden. Allí logró la proeza de licuar helio, algo que se empezaba a pensar que era imposible, a una temperatura de 4,2 K. Este gas noble era el último de los elementos que quedaba por licuar y, al conseguirlo, se abría la posibilidad de usarlo como *baño térmico* para realizar otros experimentos a baja temperatura. Es decir, una vez licuada una gran cantidad de helio, la temperatura del mismo se mantiene constante mientras se evapora (esto ocurre siempre durante los cambios de fase, por eso echamos cubitos de hielo a las bebidas), así que cualquier cosa que introduzcamos dentro se mantendrá a la temperatura de ebullición del helio. La ventaja de usar un baño térmico es doble. Por una parte, no necesitamos mantener conectado ningún aparato refrigerador y, por otra, la temperatura se mantiene exactamente en esos 4,2 K que mencionamos antes.

Kamerlingh Onnes disponía, por tanto, de lo necesario para estudiar la conductividad de cualquier metal hasta los cuatro grados sobre el cero absoluto. Así, en 1911 logró enfriar mercurio hasta solidificarlo (esto ocurre, a 1 atm, a -39°C) y luego más aún, midiendo su resistencia cada pocos grados. Lo que el científico esperaba es que la resistencia cayera suavemente a cero cuando la temperatura se acercara al cero absoluto. Otros científicos discrepan. El físico y matemático británico William Thomson, conocido como Lord Kelvin (1824-1907), una de las mejores mentes de la época, había predicho que ocurriría justo lo contrario. Para Kamerlingh Onnes, si era la vibración térmica de los átomos de un metal lo que obstruía el paso de los electrones, cuando esta se anulase completamente la corriente eléctrica fluiría sin oposición. Para Lord Kelvin, por contra, era el propio movimiento de los electrones lo que se detendría cuando se alcanzase el cero absoluto. De este modo, la resistencia se volvería infinita y la intensidad de corriente se anularía. Las dos opciones parecían igualmente razonables y solo la experimentación iba a resolver el misterio.

Sin embargo, lo que ocurrió al enfriar el mercurio no lo había previsto nadie. La hipótesis de Lord Kelvin fallaba estrepitosamente mientras que la de Kamerlingh Onnes se quedaba, en cierto modo, corta. Por encima de los 4,2 K la conductividad aumentaba lentamente al enfriar el metal pero, justo al llegar a esa *temperatura crítica*, la conductividad crecía súbitamente hasta hacerse prácticamente infinita. En otras palabras: la resistencia eléctrica del mercurio se anulaba abruptamente a una temperatura inesperada, mayor que la del cero absoluto. Por tanto, de los 0 K a los 4,2 K el mercurio se comportaba como un conductor ideal, algo que nunca se había visto hasta entonces y que, más adelante, se acabaría llamando un *superconductor*. En este estado, el mercurio, al carecer de resistencia eléctrica, bien podría

Según mi punto de vista, llevar a cabo investigaciones cuantitativas, es decir, establecer relaciones entre las distintas mediciones de los fenómenos, debería ocupar el primer lugar en la práctica experimental de la física.

KAMERLINGH ONNES

sostener indefinidamente cualquier corriente que lo atravesara, sin pérdidas de energía.

Ese efecto Joule del que hablamos hace unas páginas simplemente no debía manifestarse en el mercurio superconductor. Si la resistividad se anulaba completamente significaba que los electrones atravesarían el material como si no estuviera allí. No cedería parte de su energía a la red de átomos del metal ni, por tanto, estos aumentarían su temperatura. El mercurio superconductor no se calentaría en absoluto. ¡Si esto ocurriera así sería un resultado simplemente increíble!

Esta predicción, aunque lógica, parecía absurda para la física del momento. No se conocían sistemas sin pérdidas de energía y, de hecho, parte del éxito y de la grandeza de la termodinámica se sustentaba en la segunda ley, que establecía la entropía como el demonio definitivo de los procesos físicos. Un demonio que garantizaba que la energía siempre se estropeaba o perdía, que los procesos y los sistemas nunca eran ideales, que nunca podíamos esperar un rendimiento perfecto de ninguna máquina que construyésemos. Que el mercurio *superconductor* no manifestase el efecto Joule era algo tan sorprendente que había que realizar cuidadosamente todos los experimentos posibles para comprobarlo. Desde luego, el propio Kamerlingh Onnes se encargó de ello y comprobó que, efectivamente, una vez establecida una corriente eléctrica en un circuito fabricado con mercurio *superconductor*, esta continuaba aun después de retirar la batería que la había producido. Sin pérdidas. Sin aumentar la temperatura.

Es difícil transmitir, tras un siglo de avances tecnológicos continuados, lo excepcional que fue el descubrimiento en su momento. Nadie esperaba nada semejante. Ninguna teoría ni modelo físico contemporáneo se acercaba mínimamente a dar una explicación del fenómeno. El descubrimiento del mercurio superconductor se había adelantado casi medio siglo a las primeras explicaciones convincentes. Durante décadas se sucedieron los experimentos prácticamente a ciegas, recopilando datos que ayudaron poco a poco a comprender este cambio abrupto de las propiedades de este elemento.

SUPERCONDUCTORES DE BAJA TEMPERATURA

Pero ¿era el mercurio un improbable caso excepcional o había más conductores que presentasen una transición similar? Y, de ser así, ¿cuáles serían sus temperaturas críticas? ¿Solo los metales puros podían ser superconductores o era posible que hubiera aleaciones metálicas o cerámicas que presentaran esas propiedades? ¿Se encontraría alguna sustancia superconductora a temperatura ambiente?

Sin duda, el descubrimiento de Kamerlingh Onnes había abierto la puerta a un campo nuevo y muchos investigadores dirigieron sus esfuerzos a la búsqueda de nuevos y mejores materiales superconductores. ¿El objetivo? Encontrar un metal barato, manejable y abundante cuya temperatura crítica fuese lo más alta posible (por ejemplo, 100 K), de modo que bastara un baño térmico con nitrógeno líquido para mantener su estado superconductor. Así, durante los años siguientes se fueron encontrando materiales cuya conductividad presentaba el mismo comportamiento que la del mercurio. Sin embargo, pese a los éxitos, las temperaturas críticas no eran altas en absoluto, ya que siempre parecían mantenerse por debajo de 10 K.

Ya en 1913, el año en que Kamerlingh Onnes ganó el Nobel de Física por su hallazgo, se había descubierto el segundo elemento superconductor, el plomo. Su resistencia desaparecía al bajar de los 7,2 K (unos -265,8 °C). Más adelante se añadirían a la lista el aluminio (1,2 K), el cinc (0,85 K), el galio (1,1 K), el estaño (3,7 K), el niobio (9,2 K)... Metales puros cuyas temperaturas críticas estaban más cercanas al punto de ebullición del helio que al del nitrógeno (77,4 K). Debido a esta característica todos ellos son conocidos hoy día como *superconductores de baja temperatura* y, aunque presentan un enorme interés teórico, es difícil emplearlos en aplicaciones tecnológicas por dos motivos. El primero de ellos es que deben ser refrigerados a temperaturas bajísimas, para lo cual se usa helio líquido, un elemento muy escaso, caro y difícil de manejar.

El segundo problema surgió en el curso de los primeros experimentos. Aunque el mercurio se volvía un superconductor al bajar su temperatura, un campo magnético relativamente débil podía

anular el efecto del enfriamiento, revirtiendo el mercurio a su estado conductor normal. Teniendo en cuenta que muchos de los aparatos electrónicos que usamos emplean campos magnéticos, esto significaba que los superconductores como el mercurio difícilmente iban a ser de ninguna utilidad práctica. ¡Los mismos campos electromagnéticos inducidos por corrientes superconductoras podían destruir el estado superconductor de los elementos del propio circuito! Era un efecto indeseado y prácticamente imposible de evitar. Un revés en toda regla para quienes esperaban una aplicación tecnológica inmediata de la superconductividad.

A este tipo de materiales que, como el mercurio o el plomo, tenían temperaturas críticas cercanas al punto de ebullición del helio (4,2 K) y presentaban una sensibilidad similar a los campos magnéticos se los denominó *Superconductores de Tipo I*. Sin duda, si solo hubieran existido esta clase de superconductores el interés por los mismos apenas habría salido de los laboratorios de física. Pero, afortunadamente, las cosas iban a cambiar. En la década de 1980, dos físicos, el alemán Georg Bednorz y el suizo Alex Müller, hicieron un descubrimiento —tan sorprendente como el de Kamerlingh Onnes casi un siglo antes— que iba a revolucionar la física de los superconductores.

Tras los superconductores de Tipo I... aparecen los de Tipo II

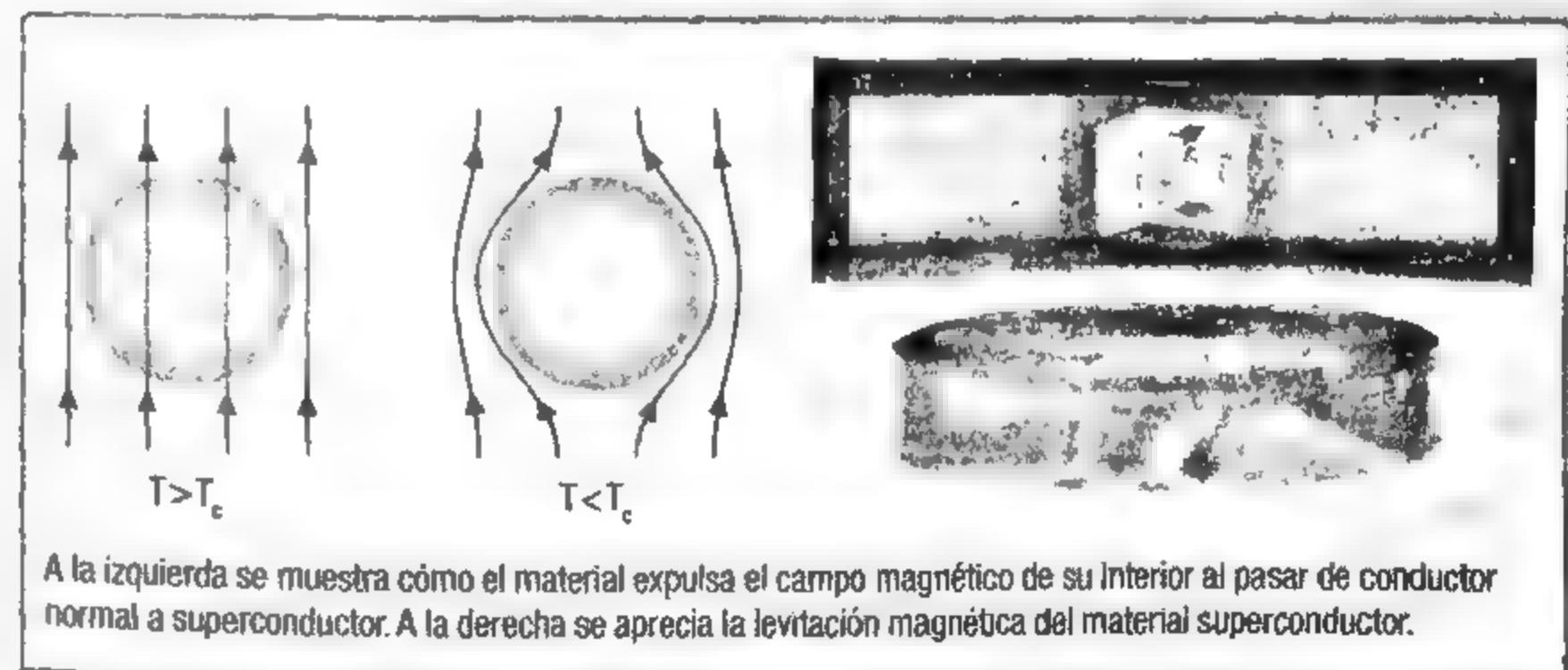
Ciertamente, cuando pensamos en conductores el primer ejemplo que se nos viene a la mente es el cobre que usamos en la instalación eléctrica de nuestras casas. Como en todos los metales de transición, el cobre dispone de electrones que pueden moverse libremente por el material y esto es una condición suficiente para que presenten una alta conductividad. Esto no significa, desde luego, que todos los metales conduzcan igual de bien la electricidad. El hierro es un conductor relativamente pobre mientras que la plata es el mejor conductor de la tabla periódica aunque, como pueden imaginar, resultaría demasiado caro emplearlo para cablear todo nuestro tendido eléctrico o para construir nuestros electrodomésticos.

EL EFECTO MEISSNER

Los conductores son materiales que se caracterizan por la presencia de cargas móviles en su interior. Estas cargas responden a los campos eléctricos y magnéticos externos de tal manera que, en el interior del conductor, en general, dichos campos disminuyen. Dentro de un superconductor, donde la conductividad es infinita, los electrones son capaces de anular completamente los campos magnéticos externos. Es decir, un superconductor se comporta de forma similar a un material diamagnético perfecto. Recordemos que los materiales diamagnéticos son aquellos que se ven repelidos por los campos magnéticos. Pero, ojo, la conductividad infinita no justificaría la expulsión del campo magnético si este existiese antes de la transición de conductor a superconductor. Es por esto que un superconductor es algo más que un conductor ideal. En cualquier caso, esa expulsión del campo magnético es lo que llamamos efecto Meissner, pues fue descubierto por el físico alemán Walter Meissner en 1933. Cuando situamos un superconductor sobre un imán se produce un efecto espectacular: el superconductor expulsa el campo magnético del imán, repeliéndolo con tanta fuerza que puede llegar a anular el efecto de la gravedad y flotar en el aire (ver figuras). La levitación magnética es una de las posibles aplicaciones tecnológicas de los superconductores.

Una buena idea difícil de aplicar

Aunque es difícil imaginar cómo podría incorporarse esta tecnología en motocicletas o automóviles, su aplicación en ferrocarriles lleva años en desarrollo. La idea es sencilla: la mayor pérdida de energía de un ferrocarril se produce por el contacto entre sus ruedas y las vías, por tanto, si conseguimos que este vehículo se sostenga sobre los rieles sin tocarlos, entonces toda esa energía puede ahorrarse o emplearse en aumentar la velocidad del aparato. Aunque ya disponemos de trenes de alta velocidad que usan este sistema, el desafío sigue siendo encontrar materiales que sean superconductores a temperaturas tan cercanas a la temperatura ambiente como fuese posible, de modo que esta tecnología pudiera desarrollar sin límites su potencial. Por el momento no representa un objetivo cercano, aunque parece factible a medio y largo plazo.



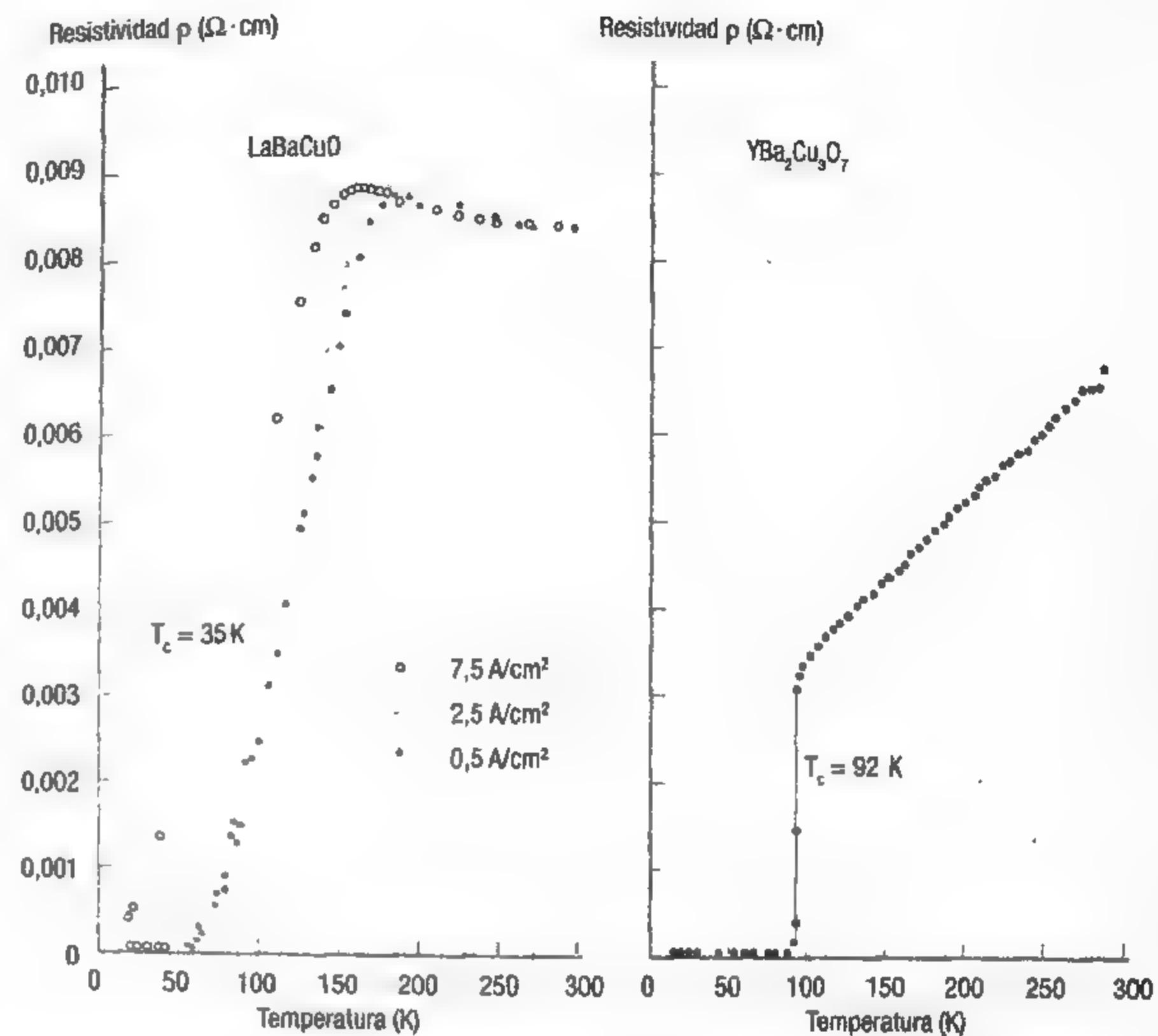
A la izquierda se muestra cómo el material expulsa el campo magnético de su interior al pasar de conductor normal a superconductor. A la derecha se aprecia la levitación magnética del material superconductor.

Hay, sin embargo, otros materiales sólidos que no son metálicos y conducen la electricidad. El ejemplo paradigmático de esto son los semiconductores como el silicio o el germanio que empleamos para fabricar diodos, transistores, LED, etc. Por contra, si pensamos en un material aislante, recordamos inmediatamente los plásticos y las cerámicas. Los primeros están formados por cadenas de compuestos orgánicos, mientras que los segundos son compuestos inorgánicos unidos mediante enlaces de carácter predominantemente iónico, como los de la sal de mesa, o covalente, como los del diamante.

¿Imaginan la sorpresa que sería descubrir que su plato de loza conduce la electricidad? Pues algo así descubrieron Georg Bednorz y Alex Müller en 1986, cuando encontraron que ciertos óxidos complejos pasaban de ser aislantes a conductores o superconductores según la temperatura a la que estaban. Su hallazgo, sin embargo, no fue producto de la casualidad. La investigación en superconductores llevaba años estancada. Se habían probado distintas aleaciones con metales y semiconductores pero las temperaturas críticas no habían pasado de 23 K. Había que romper la baraja y probar algo nuevo. Así, en 1983 Bednorz y Müller decidieron experimentar con compuestos en principio extraños y poco prometedores. Sabían que algunos óxidos metálicos tenían una baja conductividad, así que decidieron combinarlos con metales atípicos, concretamente con alguno de los 17 elementos químicos catalogados como *tierras raras* (clasificados con ese nombre porque es raro encontrarlos en una forma pura) y ver qué ocurría.

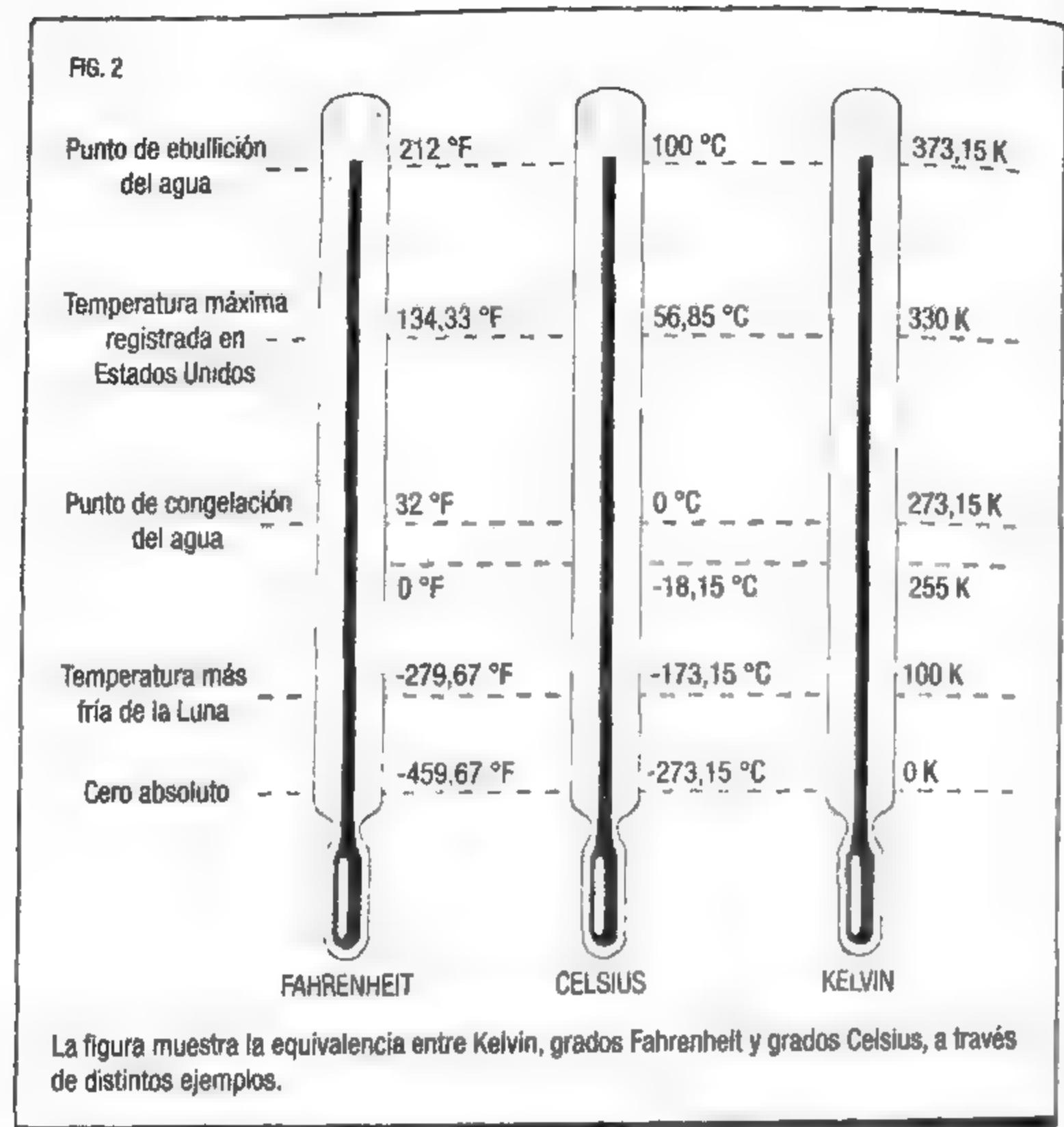
Finalmente tuvieron éxito con una cerámica formada por óxido de cobre, bario y lantano. Este material se volvía superconductor a una temperatura crítica de 35 K (figura 1) y, además, presentaba dos propiedades que lo hacían diferente de los materiales estudiados anteriormente. La primera es que la transición al estado superconductor no ocurría de forma súbita al llegar a la temperatura crítica, sino que se producía suavemente. La segunda es que esta cerámica mantenía su estado superconductor incluso cuando era sometida a campos magnéticos relativamente intensos, algo que, como ya se ha dicho, era una de las *debilidades* de los primeros superconductores. Bednorz y Müller

FIG. 1



Caracterización de la transición de conductor normal a superconductor en dos compuestos diferentes. A la izquierda el compuesto original de Bednorz y Müller, LaBaCuO. A la derecha, otro compuesto, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Las dos gráficas fueron mostradas durante el discurso de recepción del Premio Nobel que ambos ganaron en 1987. En la figura se observa la variación de la resistividad en función de la temperatura, medida para diferentes densidades de corriente. A las temperaturas críticas de 35 K (izquierda) y 92 K (derecha) se observa una caída espectacular de la resistividad que da paso al comportamiento superconductor.

no solo habían subido en más de diez grados centígrados (en la figura 2 se muestran las conversiones entre K, °C y °F) la anterior marca de temperatura crítica, sino que habían descubierto un nuevo enfoque a la hora de fabricar un nuevo tipo de supercon-

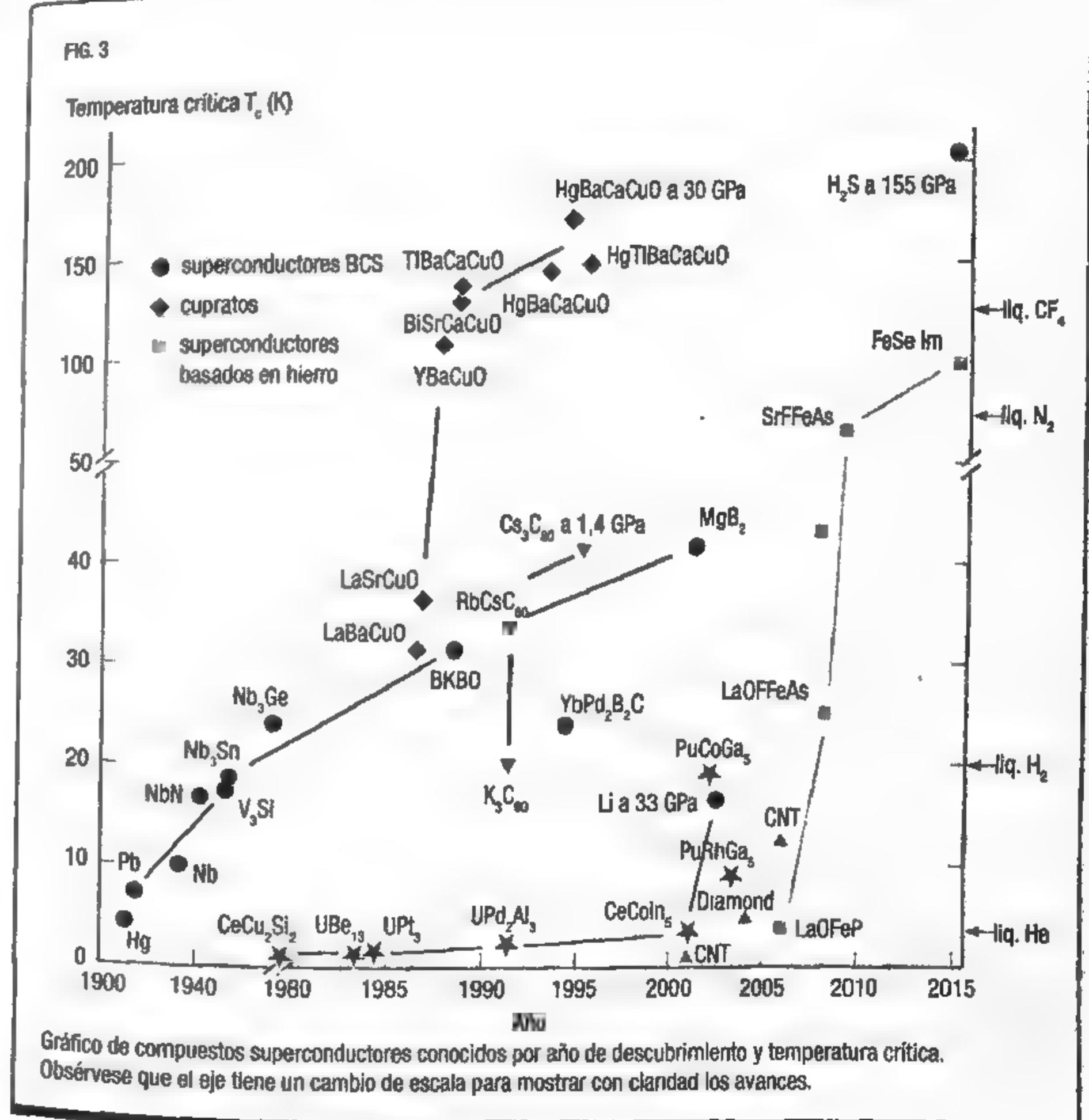


ductores que tenían propiedades aún más interesantes que las que presentaban los que descubrió Kamerlingh Onnes.

Tan solo un año más tarde, decenas de científicos seguían el camino abierto por Bednorz y Müller y, buscando composiciones cerámicas similares, lograban encontrar materiales que, por fin, presentaban temperaturas críticas por encima del punto de ebullición del nitrógeno (unos 77 K). Esta marca es muy importante porque, pasada esta temperatura, la viabilidad económica de los superconductores es total, pues se pueden mantener refrigerados usando un baño térmico de nitrógeno en estado líquido, un elemento que compone el 78% de nuestra atmósfera y que, por tanto, es muchísimo más abundante y barato que el helio. De he-

cho, actualmente hay multitud de empresas que comercializan nitrógeno líquido cuyos usos son de los más variados, desde criogenia de tejidos orgánicos hasta modernas técnicas culinarias.

A día de hoy la mayor temperatura crítica conocida a presión atmosférica es de 133 K, pero no parece haber un techo claro para estos superconductores, conocidos como de Tipo II. En la figura 3 se muestra un gráfico bastante completo de los



compuestos superconductores conocidos ordenados por año de descubrimiento y temperatura crítica. Como puede observarse, hasta los años 80 solo se conocían un puñado de compuestos superconductores y todos ellos a muy baja temperatura, pero a partir del descubrimiento de los de Tipo II se observa una gran cantidad de compuestos a temperaturas por encima incluso de 100 K.

CAPÍTULO 2

Fluidos y superfluidos

En contraste con los movimientos toscos de la materia sólida, el agua se desplaza con una aparente suavidad que puede llegar a ser extrema. Bajo ciertas condiciones su discurrir podría ser tan suave que las corrientes no llegarían a disiparse jamás.

Estamos tan habituados a beber agua, a desinfectar nuestras heridas con alcohol o a cocinar usando aceite de oliva que, probablemente, jamás nos hayamos parado a pensar ni un instante en lo realmente extraño que es el comportamiento de los líquidos, en comparación con los otros estados bajo los que se presenta la materia. Las sustancias sólidas, desde luego, parecen mucho más sencillas: son compactas y tienen una forma definida, ya sea la que les damos nosotros en nuestras fraguas, fábricas y talleres o bien la que resulta de diversos procesos naturales, geológicos o biológicos. ¿Hay algo más hermoso que un árbol? ¿Algo con líneas más elegantes que una herramienta metálica? Los gases, por otra parte, nos rodean invisibles pero parecen aún más fáciles de comprender: sencillamente llenan cualquier recipiente donde estén. ¡No parecen hacer otra cosa que esa! Si no fuese porque sentimos el viento en nuestra piel seguramente muchos no creerían en su existencia.

¿Y qué pasa con los líquidos? Fíjémonos en el agua del mar, por ejemplo (ver imagen superior en página 43): no tiene forma pero sí un volumen constante, no puede agarrarse, es parcialmente transparente, fluye, gotea, forma olas en su superficie,

se condensa en las superficies sólidas, se evapora cuando hace calor, produce espuma cuando choca violentamente contra las rocas y nos moja las manos cuando las introducimos en su seno. Si nos detenemos un minuto a observar las diferencias entre los distintos estados de la materia vemos que los líquidos presentan unas estructuras efímeras, a medio camino entre la locura anárquica de los gases y la constante rotundidad de los sólidos. Sin embargo, al fijarnos en la capacidad de gases y líquidos para amoldarse a cualquier recipiente o para moverse por cauces o tuberías vemos que ambos comparten una propiedad esencial: sus moléculas pueden deslizarse libremente unas sobre otras. Es por esto que solemos llamar «fluidos» a ambos estados.

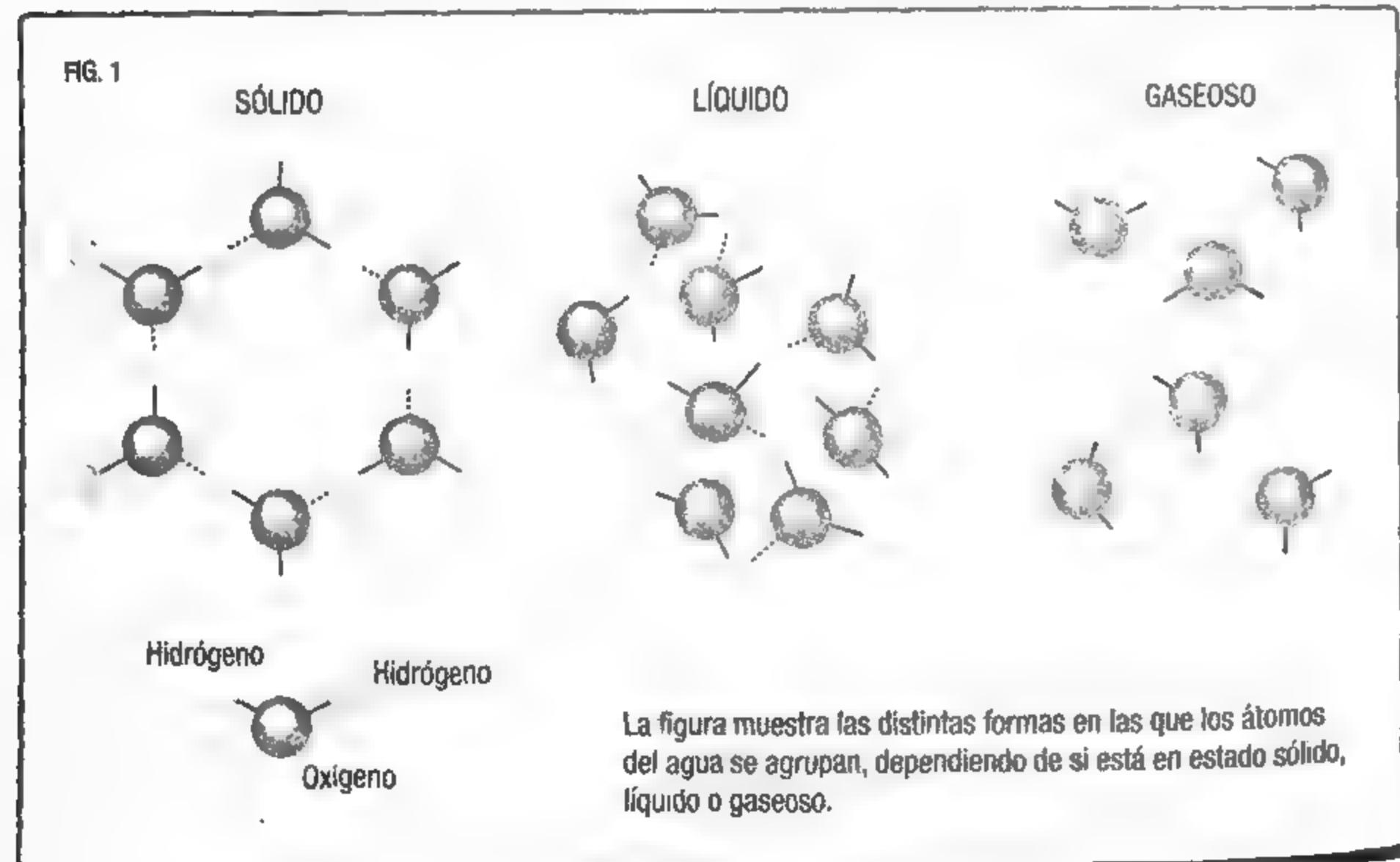
Aun teniendo en cuenta estas consideraciones generales sobre los distintos estados de agregación de la materia, conviene recordar que no todas las sustancias tienen exactamente las mismas características. En particular, no todos los líquidos son iguales ni se comportan siempre como lo hace el agua, que es el ejemplo al que más veces recurrimos por ser también el que mejor conocemos (figura 1). Si nos detenemos a analizar algunas

de las propiedades de este estado veremos esto más claramente. Empecemos por una característica esencial que es la que los distingue de los gases: los líquidos son casi incompresibles. Es decir, se necesita ejercer una fuerza enorme sobre ellos para hacer disminuir su volumen. Cuando esto ocurre, la mayoría de sustancias se comprime y puede llegar a sufrir una transformación (llamada «transición de fase» y que ya veremos con algo de detalle más adelante) hacia el estado sólido. El agua, por contra, necesita expandirse para convertirse en hielo, que es menos denso, por lo que no se transforma en sólido cuando sufre una compresión. ¡Nuestro ejemplo habitual resulta ser una excepción a la norma!

También es común que cuando calentamos un líquido se produzca una dilatación: cuanto mayor sea su temperatura, tanto mayor será el volumen que ocupe y tanto menor su densidad. Esto ocurrirá de forma progresiva hasta que alcancemos cierto valor, la temperatura de ebullición, momento en el que todo el calor que aportemos al material se consumirá en una transición de fase hacia el estado gaseoso. ¿Y qué pasa con el agua? ¿También es especial en esto? Pues resulta que sí. En nuestro bendito líquido de referencia, la relación entre la temperatura y la densidad no es monótona: el volumen del agua no aumenta continuamente al ser calentada. Si partimos de cierta cantidad a 0 °C y procedemos a calentarla lentamente, veremos que el agua encoge ligerísimamente hasta los 4 °C, aumentando por tanto su densidad hasta alcanzar un valor máximo. A partir de ahí, si seguimos calentando, el volumen comienza a aumentar progresivamente, comportándose de forma «normal». Esto quiere decir que el agua es más pesada justo a 4 °C, lo que es de vital importancia para la fauna y la flora de ríos y lagos de latitudes septentrionales: cuando las temperaturas de la superficie bajan por debajo del punto de congelación, el agua de las profundidades (que está a 4 °C) queda aislada del exterior por una capa de hielo en la superficie y esto permite que la vida animal y vegetal pueda sobrevivir a las temperaturas invernales.

El agua, como vemos, es un líquido excepcional. Aunque es un excelente ejemplo para la mayoría de fenómenos relativos a este

FIG. 1

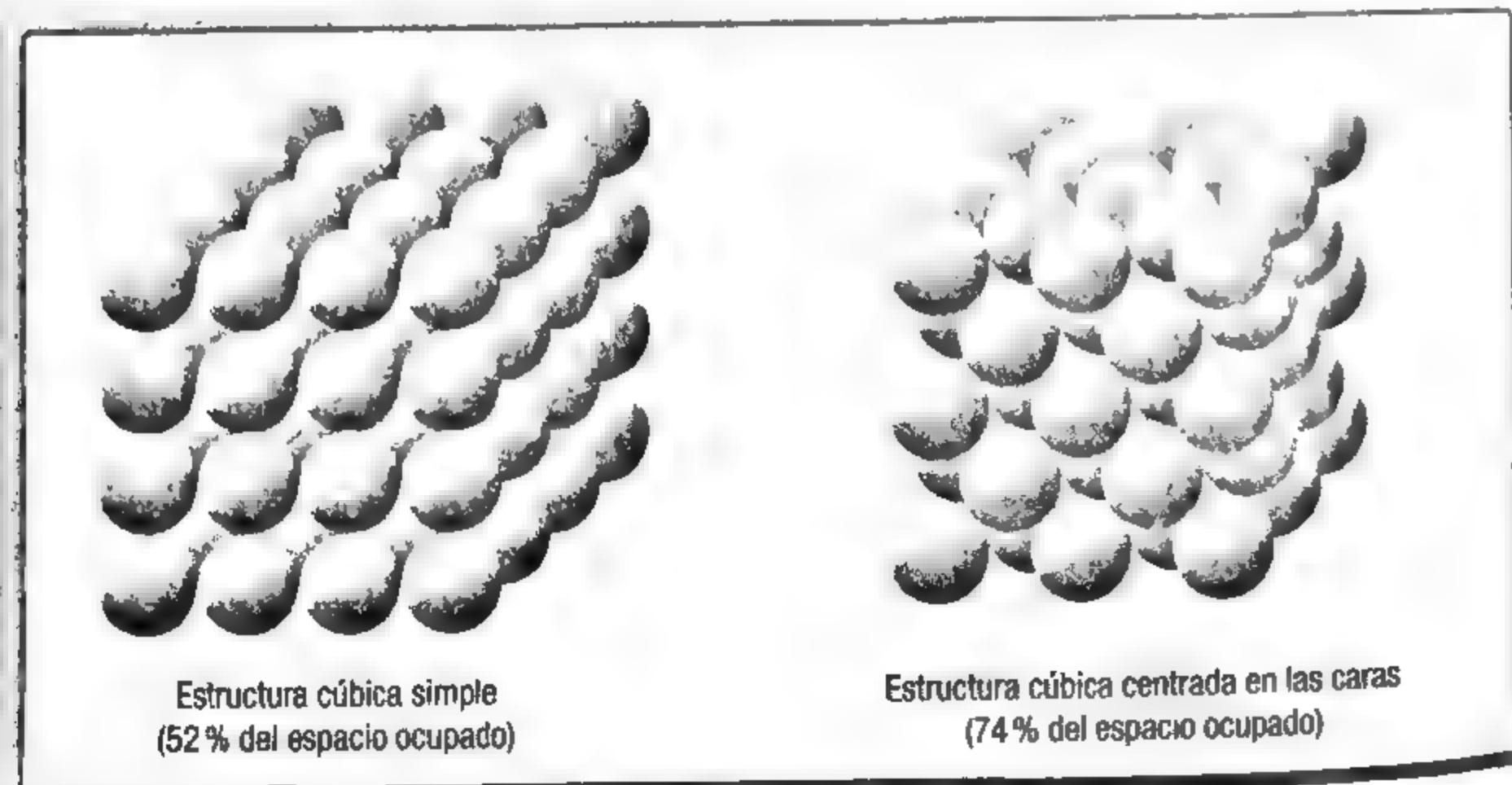


¿QUÉ ES LA DENSIDAD DE UN MATERIAL?

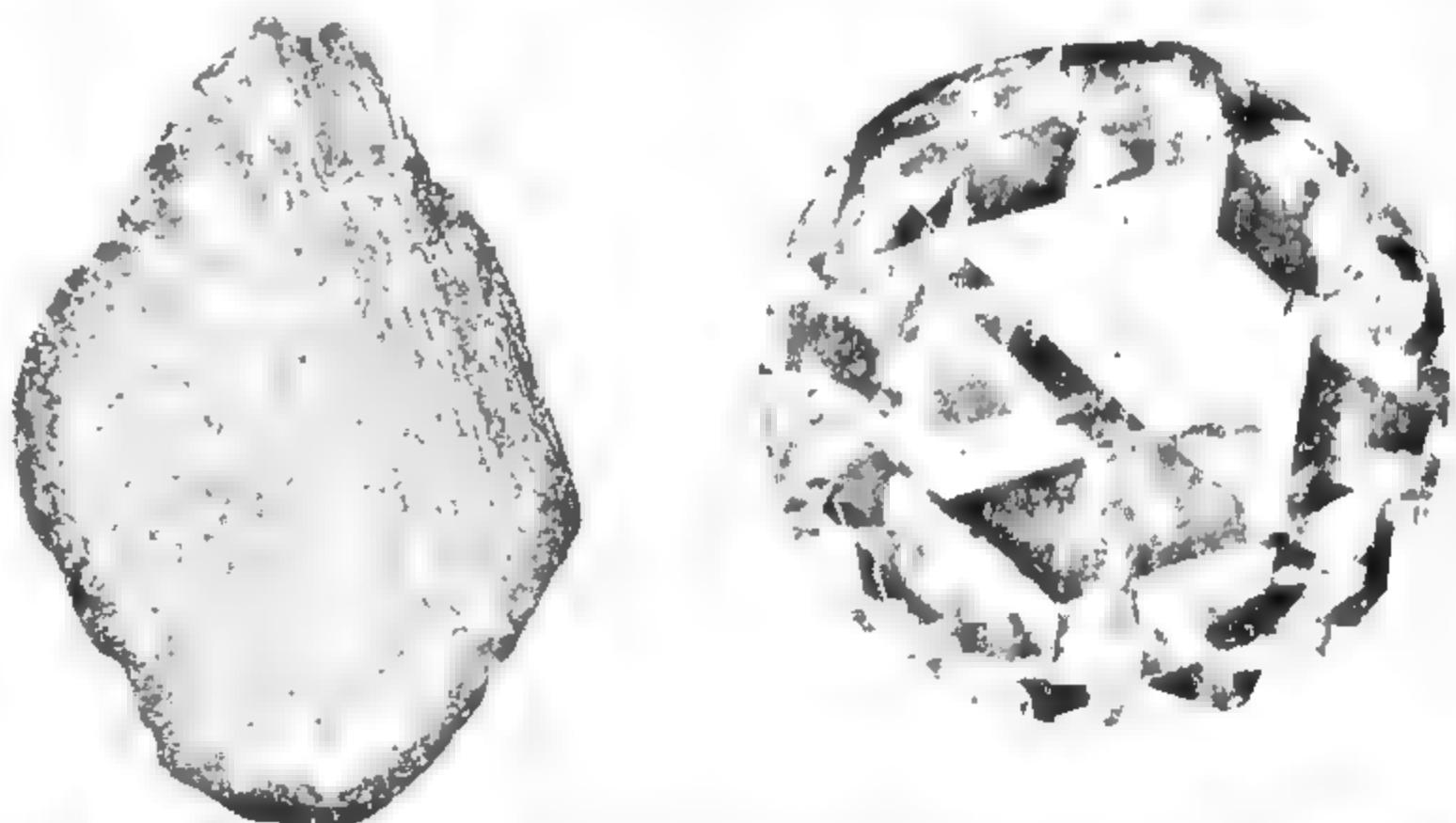
La densidad de un material se define como el cociente entre la masa que posee y el volumen que ocupa. En los gases, la densidad varía muchísimo según aumente o disminuya la temperatura y la presión a la que se encuentran, pero en líquidos y sólidos la densidad es una magnitud que varía relativamente poco y que, además, no cambia demasiado entre un estado y otro. En la mayoría de sustancias ocurre que los sólidos son más densos que el líquido correspondiente, pero hay algunos ejemplos, como el del agua, en el que ocurre justo lo contrario. Si queremos calcular la densidad de un sólido, necesitamos conocer tres parámetros. El primero, esencial pero también el más sencillo de descubrir, es la masa de los átomos que lo forman. El segundo, el diámetro aproximado de dichos átomos, que en general variará entre dos y seis décimas de nanómetro (una mil millonésima de metro). El tercero es la forma en la que se empaquetan para formar el sólido. ¿Es una configuración como la del diamante? ¿Es, quizás, la del cloruro sódico? ¿Es la del hierro? ¿La del grafito? Según sea la estructura la densidad puede variar enormemente incluso en el caso del mismo elemento. Por ejemplo: la densidad del diamante es un 50 % superior a la del grafito (imágenes de la derecha), aun cuando ambos materiales están formados únicamente por carbono.

Empaquetando canicas, a modo de átomos

Hagamos un cálculo con unas canicas. Imaginemos que tenemos una caja y echamos dentro canicas de unos 50 g de masa y 1 cm de radio. Imaginemos que, sencillamente, dividimos la caja en pequeños cubos de 2 cm de lado y que metemos una canica en cada uno de esos cubos. No es una idea descabellada: aunque esta no es la mejor forma de empaquetar esferas en una caja, algunos cristales realmente adoptan esta configuración. Al meter cada esfera en un cubo individual estamos ocupando solo el 52 % de espacio disponible, ¡apenas la mitad!



pero consolémonos pensando que si buscásemos la mejor opción para ocupar el máximo volumen posible podríamos llegar a ocupar hasta el 74 % del mismo, pero no más. Lo cierto es que, cuando se intenta apilar esferas del mismo tamaño, siempre se desaprovecha muchísimo espacio. Bien, ya tenemos nuestras canicas en sus cubos individuales y conocemos el modo de empaquetamiento. Si queremos calcular la densidad solo tenemos que hacer una operación muy sencilla: cada cubo de 2 cm de lado tendrá un volumen de 8 cm^3 y contendrá una masa de 50 g, por tanto su densidad será el cociente entre 50 g y 8 cm^3 , es decir, $6,25 \text{ g/cm}^3$. Imaginemos que, en lugar de meter cada canica en un cubo individual, hubiésemos intentado aprovechar al máximo el espacio, colocando cada una en el hueco que dejan las de alrededor. En ese caso habríamos ocupado, como ya hemos dicho, el 74 % del volumen en lugar del 52 % anterior (ver figura), por lo que la densidad se habría multiplicado por el cociente entre 74 y 52. Es decir, habría llegado a los $8,89 \text{ g/cm}^3$. Es un aumento importante de algo más del 40 %, por eso, para hacer las estimaciones de densidad de un sólido, es tan importante conocer la estructura que adoptan sus átomos. Para un líquido, por otra parte, la cuestión es más sutil. Ya hemos anticipado que, en general, no hay grandes diferencias entre un estado y otro y que los líquidos suelen ser más ligeros, pero ¿de cuánta diferencia hablamos? En el caso del hierro, por ejemplo, el sólido es un 9 % más denso que en su fase fundida; para el cobre la diferencia es del 12 %; en la plata es del 13 %; cuando hablamos del aluminio la diferencia de densidades llega al 14 %... Es decir, las diferencias en los metales de transición más comunes oscilan en torno al diez o el quince por ciento pero no es algo que podamos extrapolar a toda la tabla periódica. El litio, un metal alcalino, presenta tan solo una diferencia de densidades del 4 % entre sus fases sólida y líquida, mientras que en el carbono, por contra, la diferencia es casi del 100 %.



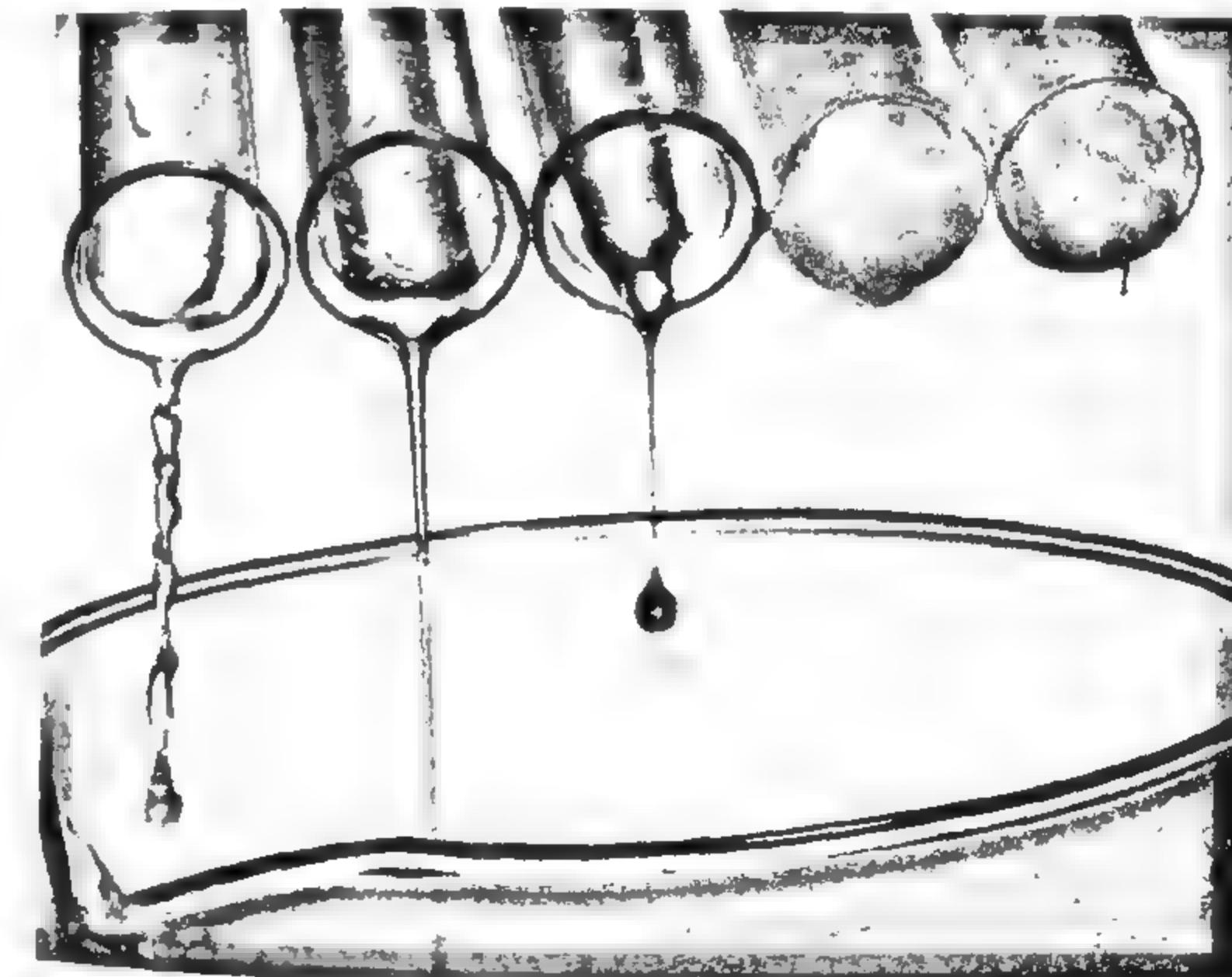
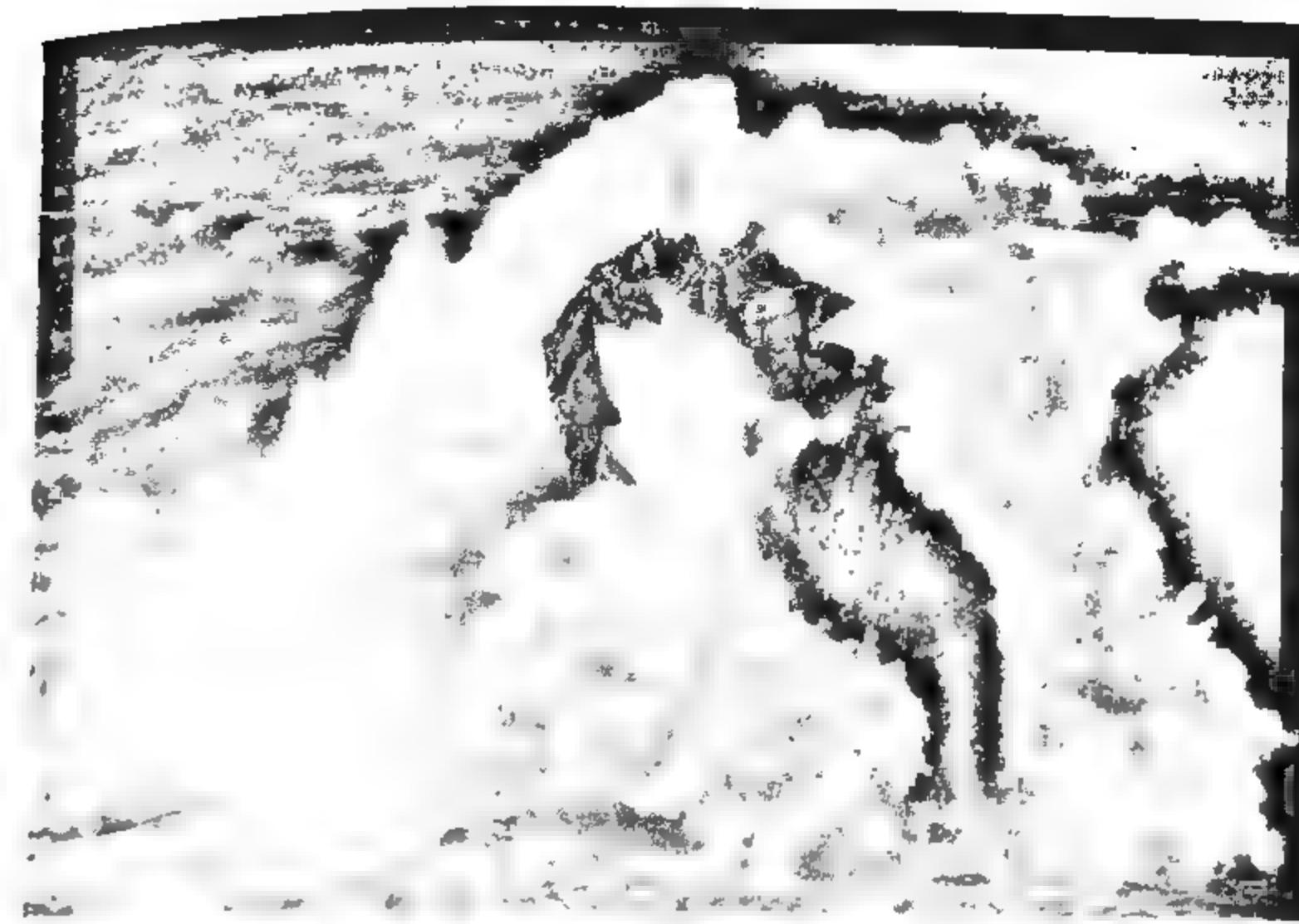
El grafito y el diamante están constituidos únicamente por átomos de carbono, pero la estructura de sus enlaces difiere mucho y, con ella, la densidad del material resultante.

estado de la materia, conviene insistir en que hay ocasiones en las que no es el mejor ejemplo posible. Pensemos en una sustancia distinta, el mercurio, del que tanto hemos hablado en el capítulo anterior. El mercurio es un metal líquido a temperatura ambiente que, aunque ya está en desuso debido a su toxicidad, hasta hace pocos años podíamos encontrarlo en el interior de algún viejo termómetro. Quizá no todos hayamos roto alguna vez uno de esos artefactos pero quienes lo hicimos, por supuesto «por accidente», descubrimos una propiedad absolutamente maravillosa del mercurio que se nos derramaba sobre la mesa: ¡El mercurio no la mojaba! Simplemente formaba pequeñas esferas metálicas que se deslizaban por la superficie como gotas de agua sobre un tejido engrasado. Estas gotas, cuando se unían en número suficiente, formaban un charquito que, pese a todo, seguía negándose a empapar ni mesas ni cuadernos. (Sin embargo, si el mercurio se hubiera vertido sobre una lámina de aluminio, se habría producido una amalgama, aunque este proceso ya no es físico, sino químico).

Otra propiedad que nos permite distinguir unos líquidos de otros es la viscosidad (en la imagen inferior de la página contigua, diferencia de viscosidad entre distintos líquidos), que no es sino la resistencia que ofrece el fluido al movimiento. Cuando tomamos un recipiente y vertemos su contenido, la velocidad con que este cae dependerá —además de algunos factores externos como la inclinación— de dicha resistencia. Un líquido viscoso caerá lentamente y uno que apenas lo sea caerá mucho más deprisa. Aunque tiene cierta lógica suponer que los líquidos más densos son también los más viscosos, en realidad no es así: el mercurio, por ejemplo, es apenas el doble de viscoso que el agua y se vierte con suma facilidad, mientras que el aceite de oliva y la miel, aunque mucho menos pesados que el mercurio, son 90 y 10 000 veces más viscosos que el agua, respectivamente.

¿QUÉ HACE QUE LOS LÍQUIDOS SEAN COMO SON?

Antes hemos comparado los líquidos con los gases y los sólidos, pero ha sido de un modo fenomenológico y superficial. Ahora



El agua de mar (superior) forma, en estado líquido, estructuras efímeras como las olas o la espuma. Sobre estas líneas, la viscosidad de un líquido incide en la velocidad a la que este se desliza.

bien, la física no solo se ocupa de recoger todos los fenómenos existentes para tratar de explicarlos *ad hoc* mediante modelos o leyes, también debe profundizar en el estudio de las causas que producen dichos fenómenos y, gracias a esto, hallar nuevas propiedades o prever ciertos comportamientos. En el caso de los estados de agregación de la materia, de los que a parte de los tres clásicos sabemos que hay varios más, es importante comprender cómo la estructura interna y las propiedades de las partículas microscópicas que forman un sistema condicionan el comportamiento del conjunto a gran escala. Pensemos en un gas. Un gas es un conjunto poco denso de moléculas que viajan libremente por el espacio. Dichas moléculas son tan pequeñas que, prácticamente, no interactúan unas con otras. Apenas colisionan algunas veces pero son tan rápidas que, cuando chocan, dichas interacciones transcurren durante un instante minúsculo. Un ejemplo perfecto serían unas bolas de billar que, si no hay rozamiento, se mueven en línea recta por el tapete hasta que colisionan, de vez en cuando, con otra bola. Las moléculas de oxígeno que llenan nuestra habitación pasan mucho más tiempo viajando solitarias que colisionando unas con otras. Es más, las moléculas son tan pequeñas y están tan alejadas entre sí que, a efectos prácticos, es como si no tuvieran volumen, por eso, cuando queremos estudiar un gas, trabajamos muchas veces con una aproximación que llamamos *gas ideal*, que es un gas formado por partículas puntuales, sin extensión, que no interactúan entre ellas y cuyas colisiones con las paredes del recipiente que las contiene son perfectamente elásticas. Es decir, es una especie de exageración de lo que es un *gas real*, que resulta muy útil para estudiar las propiedades generales de los gases. En otras palabras, es un modelo que funciona.

En cambio, cuando observamos un sólido las cosas se vuelven más complicadas. Para empezar, los sólidos pueden tener una estructura definida, como por ejemplo la de un cristal de sal o de sílice, o bien ser amorfos como un vidrio o un bloque de hormigón. Pero si queremos comprender bien cuál es la característica fundamental que determina ese estado de la materia, tenemos que pensar en un modelo que retenga sus mínimas propiedades. Recordemos el *gas ideal* que hemos visto antes. Imaginemos que lo

tenemos encerrado en una caja entre dos pistones. Sabemos que un *gas real*, encerrado y sometido a suficiente presión acabaría por transformarse en un sólido. Sin embargo, si comprimimos nuestro *gas ideal*, ¿alguna vez se compactará y transformará en un sólido...? ¡Jamás! Dado que las partículas que lo forman tienen un volumen estrictamente cero, podremos comprimirlo sin límite, y sin que llegue a formarse una estructura diferente. Al final, tendríamos un *gas sin volumen* (lo que no tiene sentido!), pero nada más.

Imaginemos pues que, en lugar de un *gas de moléculas sin volumen*, tenemos un *gas de pequeñas esferas*, como canicas, que vuelan dentro de una caja. Si acercamos cada vez más las paredes de esa caja, nuestras partículas se acomodarán poco a poco en el espacio vacante, ocupando lo mejor posible los huecos disponibles, hasta llegar a un punto en que fuese imposible comprimir más el sistema sin aplastar sus moléculas constituyentes. Justo en ese punto, cuando mirásemos la organización del sistema veríamos que las esferas se han situado de forma ordenada y compacta, justo como esperaríamos que ocurriese si tuviésemos un material sólido (y cristalino). Es decir, el requisito mínimo para conseguir una estructura compacta es que sus constituyentes tengan un volumen no nulo. ¡Es difícil exigirle menos a la naturaleza!

Sin embargo, ha ocurrido algo extraño en este paso de *gas a sólido*: ¿no debería haberse formado previamente un líquido? Cuando tenemos nitrógeno gaseoso y lo comprimimos sabemos que primero se transforma en líquido y luego en sólido. ¿Por qué aquí no? Además, ¿por qué en este modelo no juega ningún papel la temperatura? Sin duda porque nuestras canicas son una aproximación demasiado burda de las moléculas reales. ¿Qué les falta a nuestras canicas para transformarse en un líquido? Recordemos nuestro punto de partida: al principio hemos dicho que en un *gas* las partículas ocupan poquísimo volumen e interactúan poquísimamente entre ellas. Luego hemos visto que el volumen es realmente importante si queremos considerar otros estados y que no podemos dejarlo de lado. ¿Pasa lo mismo con esa interacción que no hemos tenido en cuenta? Efectivamente así es: cuando tenemos moléculas próximas entre sí, los electrones que

LA RESISTENCIA DE LOS FLUIDOS A DEFORMARSE: LA VISCOSIDAD

Hemos hablado de la viscosidad de forma heurística, sin dar una definición precisa de cómo se mide ni qué unidades se usan para hacerlo. Aunque para entender los fenómenos más sencillos es suficiente con tener una noción intuitiva de las propiedades de la materia. Por ello vamos a intentar describir con más detalle cómo surge este concepto mediante una definición operacional. Imaginemos que tenemos un recipiente con un líquido en reposo cuya superficie está a cierta altura (h) del fondo. Si colocamos sobre el líquido una superficie flotante con área conocida (A) y la movemos con cierta velocidad (V), por ejemplo a la derecha, el rozamiento del líquido intentará frenar ese movimiento oponiendo una fuerza (F) que empujará dicha superficie hacia la izquierda. Al desplazar la capa superior ocurrirá que esta arrastrará a la capa inmediatamente inferior, esta a la de más abajo, y así sucesivamente hasta llegar al líquido del fondo, que por estar en contacto con el recipiente permanecerá siempre en reposo. Ahora pensemos cómo se comportaría esta fuerza de rozamiento cuando alteramos las variables que manejamos (ver figura). Para empezar, cuanto mayor sea la velocidad tanto más nos costará mover la superficie. Podemos suponer que son magnitudes proporcionales, ya que esta relación matemática es la más sencilla posible que cumple nuestro supuesto. En segundo lugar, no es lo mismo arrastrar un cuerpo que ofrece una gran superficie de rozamiento que uno más pequeño, así que podemos asumir que la fuerza de rozamiento también será proporcional al área del cuerpo. Por último, como el líquido está en reposo, al mover la superficie lo arrastraremos parcialmente con ella... pero dado que la capa pegada al fondo debe estar siempre en reposo, costará más mover la superficie cuanto menos profundo sea el líquido. Es decir, si la profundidad es pequeña la fuerza será grande y viceversa. La relación matemática más sencilla que cumple esta condición es la proporcionalidad inversa. Por tanto, la fuerza que se opone al movimiento será directamente proporcional al producto de la velocidad y el área e inversamente proporcional a la profundidad. Es un razonamiento que puede parecer sencillo o incluso tránsito, pero que nos resulta útil para definir la viscosidad.

F es directamente proporcional a V .

F es directamente proporcional a A .

F es inversamente proporcional a h .

Por tanto:

F es directamente proporcional a $A \cdot V/h$.

La constante de proporcionalidad

Sabemos ya que la fuerza es proporcional a una serie de magnitudes. Ahora bien, cuando dos cantidades son proporcionales es porque al multiplicar una por cierta constante obtenemos siempre la otra. Esta constante de proporcionalidad que nos falta por añadir para tener una ecuación bien definida es justamente la viscosidad. De este modo la fuerza (F) será igual al producto de la viscosidad (μ), el área (A) y la velocidad (V) dividido por la profundidad (h). O, dicho de otro modo, si tenemos un líquido en las condiciones descritas y arrastramos su superficie, podemos calcular su viscosidad a partir de las medidas de las cuatro magnitudes anteriores.

resolviendo una ecuación de primer grado que no tiene misterios para ningún alumno de secundaria. Aunque hemos definido la viscosidad a partir de cuánto cuesta arrastrar la superficie de un líquido, realizar este proceso dificulta hacer buenas medidas y hay otros procedimientos estándar mucho mejores para medir directamente esta magnitud. En cualquier caso, si medimos la profundidad en metros, el área en metros cuadrados, la velocidad en metros partido por segundo y la fuerza en newton, la viscosidad nos queda en pascales por segundo ($\text{Pa} \cdot \text{s}$), que es una unidad relativamente grande para los líquidos a los que estamos más habituados. La viscosidad del agua, por ejemplo, sería de un milipascal por segundo ($1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$), unidad que también se llama centipoise (cps). La viscosidad de otros líquidos va desde los 0,5 cps del metanol a los 25 cps del vino o los 10000 cps de la miel. Es una magnitud que, como vemos, varía enormemente de unos compuestos a otros. También es posible medirla en gases y en sólidos. En el primer caso, en condiciones normales (1 atm y 25°C), es del orden de milésimas de centipoise mientras que en el segundo puede ser del orden de billones.

Si llamamos μ a la constante de proporcionalidad: $F = \mu \cdot A \cdot V/h$.

Donde, de hecho, dicha constante es lo que hemos llamado viscosidad, que puede calcularse mediante: $\mu = F \cdot h / (A \cdot V)$.

PERFIL DE VELOCIDAD DE UN FLUIDO EN MOVIMIENTO

Medio gaseoso sobre el líquido (no juega ningún papel)

Velocidad: V

CAPA QUE ARRASTRAMOS (DE ÁREA A)

Velocidad: $V_1 < V$

Velocidad: $V_2 < V_1$

Velocidad: $V_3 < V_2$

Velocidad: $V_4 = 0 < V_3$ CAPA EN EL FONDO JUANETO AL FONDO

FONDO DEL RECIPIENTE

las forman se afectan unos a otros, recolocándose de tal modo que dichas moléculas pueden atraerse débilmente entre ellas. Imaginemos, pues, que tenemos un gas formado por canicas «ligeramente pegajosas» y que volvemos a comprimirlo despacito entre un par de pistones. Cuando estas partículas se acercan con demasiada rapidez se producen colisiones bruscas y no notan apenas esa débil atracción entre ellas. Sin embargo, cuando se acercan despacio es posible que dos moléculas se queden pegadas durante cierto tiempo. Es más, puede ocurrir que llegue otra molécula lenta y que se pegue a las anteriores... O bien que llegue una rápida y desbarajuste el grupo. En general habrá un balance entre la formación y la destrucción de esos pequeños conglomerados. Que existan más o menos en un cierto instante dependerá de la velocidad promedio que tengan las partículas y de lo cerca que estén entre sí. Cuando nuestro gas de canicas pegajosas esté suficientemente comprimido y la velocidad de sus partículas sea relativamente escasa (es decir, cuando la temperatura sea baja) tendremos un sistema formado por agregados que se forman y se rompen continuamente, resultando que toda la masa de partículas se mantiene cohesionada aunque su estructura sea casi tan impredecible como la del gas «de canicas lisas». Es decir, tendremos un líquido.

Las propiedades más sencillas de este estado pueden entenderse perfectamente con este modelo de canicas pegajosas. Un líquido tiene un volumen casi fijo porque las partículas que lo constituyen, normalmente moléculas, están casi todas en contacto con las de alrededor. Esto hace que su forma no esté definida porque las moléculas no tienen posiciones fijas, sino que interactúan continuamente unas con otras, cambiando de posición. Por todo lo anterior, tenemos por un lado que la viscosidad será tanto menor cuanto mayor sea la temperatura del sistema, ya que cuanto mayor es la velocidad de las partículas menos relevante es que sean pegajosas. Por otra parte, si las moléculas se pegan muy fuertemente entre sí, el líquido mojará poco porque tenderá a recogerse sobre sí mismo. Por supuesto no todas las moléculas parecen esferas, no todas son tan pegajosas y no todas lo son igual por toda su superficie, pero si jugásemos con

pequeñas variaciones del modelo (pensemos en moléculas alargadas o en pequeñas esferas con una o dos zonas pegajosas concretas...) podríamos comprender algunos comportamientos que son ciertamente más complejos, como el de los cristales líquidos o las «extrañas» propiedades del agua que hemos mencionado antes. Sin duda, la naturaleza siempre nos sorprende.

LA DESEADA LICUEFACCIÓN DEL HELIO

A finales del siglo XIX ya se conocía la mayoría de elementos naturales de la tabla periódica. Algunos de los más difíciles de descubrir fueron los gases nobles, debido a su especial reticencia a reaccionar con otros elementos por medios químicos. Cuando unas décadas más adelante se comprendió la estructura atómica de la materia se descubrió que estos gases presentaban una estructura electrónica muy estable. Es decir, su configuración era óptima y ningún intercambio de electrones con otros átomos iba a mejorarla. Los átomos de helio, neón, argón, kriptón, xenón y radón se comportaban, más que ningún otro átomo, como esas canicas lisas de las que hemos hablado recientemente. Ocurre, además, que los electrones están tanto más ligados al átomo cuanto más cerca estén de su núcleo, por lo que, en el caso de los gases nobles, el tamaño iba a jugar un papel importante. Cuanto más pequeño el átomo, «más liso», más estable y más difícilmente reaccionaría con otros átomos. Por tanto, de todos los gases nobles, el menos reactivo debía de ser el helio.

Aunque el paso de un estado a otro no es una reacción química, la misma estabilidad electrónica que dificulta la formación de enlaces también supone un hándicap a la hora de formar las asociaciones que exige el estado líquido. Así, se encontró que los gases nobles eran progresivamente difíciles de licuar. Cuanto más ligero el gas, tanto más había que enfriarlo. El radón, a la presión atmosférica, se transformaba en líquido a 202 K (recordemos la escala Kelvin, cuyo cero es el cero absoluto de temperaturas y la temperatura ambiente es de unos 300 K), el xenón a 162 K, el kriptón a 116 K, el argón a 84 K (muy cerca de otros gases como

el oxígeno, el nitrógeno o el flúor), el neón a 25 K (solo unos kelvin por encima del hidrógeno) y el helio... El helio se resistía a abandonar el estado gaseoso hasta que, como ya hemos contado, el físico neerlandés Kamerlingh Onnes logró bajar su temperatura hasta los 4,2 K en 1908, produciéndose entonces la transformación de gas a líquido.

Creo que puedo decir con seguridad que nadie entiende la mecánica cuántica.

RICHARD FEYNMAN

Una vez logrado el objetivo, restaba estudiar el helio líquido y comprobar si sus propiedades eran las que se esperaba: cuando se conoce la interacción entre moléculas y su volumen, en principio es posible predecir bastante bien algunas de sus características y hacer algunas suposiciones bien orientadas acerca de otras. Por ejemplo, algo que debería ser sencillo es el cálculo de la densidad. Imaginemos que tenemos un líquido de «canicas pegajosas». Si la interacción atractiva (pegajosa) entre ellas es de muy corto alcance, entonces la distancia entre partículas será ligeramente mayor que su diámetro por lo que, sabiendo la masa de las canicas individuales, el cálculo aproximado de la densidad no entraña ninguna dificultad... Lamentablemente, cuando intentamos aplicar la física clásica —que tan bien funciona con objetos grandes, lentos y pesados— a átomos del tamaño del helio, los resultados son nefastos. ¡La densidad estimada del helio líquido es muy superior a la real! Es como si el helio líquido fuese menos cohesionado que un líquido normal. O, más bien, como si su cohesión fuese el resultado de algo que no podemos entender mediante el juego mental de las canicas. Y ese algo no es otra cosa que las matemáticas de la física cuántica. Los átomos de helio son tan pequeños y se acercan tanto unos a otros que ponen de manifiesto las «extrañas» propiedades de los sistemas cuánticos.

EL HELIO SUPERFLUIDO

Pese a que la licuefacción del helio se consiguió en 1908, no fue hasta bastante más tarde que se descubrió una de sus pro-

piedades más fascinantes. En 1937 el físico ruso Pyotr Kapitsa (1894-1984) e, independientemente, los físicos canadienses John F. Allen (1908-2001) y Donald Misener (1911-1996) estudiaron la forma en que fluye el helio a temperaturas alrededor de los 2,17 K. Esta temperatura se llamó el *punto lambda* porque, al estudiar la variación de la capacidad calorífica del helio, se observa una curva con el mismo aspecto de esta letra griega (figura 2). Diez años antes, el físico neerlandés W.H. Keeson (1876-1956) había estudiado el calor específico, una medida de cuánto aumenta la temperatura por unidad de masa al añadir calor a la muestra. En el caso del helio líquido, se encontró un cambio de comportamiento muy peculiar a dicha temperatura. En 1937 Kapitsa midió la viscosidad del helio líquido en esta zona de temperaturas, observando el flujo de helio líquido entre dos cilindros conectados por un tubo muy estrecho, de medio micrómetro, esto es, una millonésima de metro. Solo cuando la temperatura bajaba de los 2,17 K se observaba flujo entre los cilindros. Allen y Misener midieron el flujo de helio a través de capilares en la misma zona de temperaturas, alrededor del punto lambda. Ambos grupos descubrieron el mismo fenómeno: por debajo de los 2,17 K, el líquido no presenta ninguna viscosidad. La sorpresa fue similar a la que tuvo décadas antes Kamerlingh Onnes cuando descubrió que la conductividad eléctrica del mercurio desaparece a los 4,2 K. De hecho, Kapitsa comentó en su artículo la similitud entre ambos efectos, aunque en esta época nadie sabía el porqué de la superconductividad descubierta por Kamerlingh Onnes. De hecho, el resultado es más extraño aún que el del físico neerlandés porque el comportamiento habitual de esta propiedad es el opuesto al encontrado: lo normal es que la viscosidad aumente al bajar la temperatura, los líquidos pierden fluidez cuando se los enfriá, ¡no al revés! De nuevo, al igual que pasaba con la densidad del helio líquido, apareció un comportamiento anómalo que es completamente inexplicable desde el punto de vista de la física clásica. No hay ningún mecanismo conocido por el cual desaparezca la resistencia interna en un líquido.

A veces resulta tan sencillo usar las palabras que no nos molestamos en entender qué significan. Kapitsa, Allen y Misener encon-

KAMERLINGH ONNES Y SU FACTORÍA DEL FRÍO

La licuefacción del helio y consiguiente descubrimiento de la superconductividad por el grupo encabezado por Kamerlingh Onnes supuso uno de los grandes hitos experimentales de la física. Conseguirlo fue una tarea titánica llevada a cabo por el científico neerlandés que consiguió involucrar a todos los estamentos de la ciudad de Leiden para mantener sus líneas de investigación sobre frío. Onnes comenzó muy joven, en 1882. Con apenas 29 años arrancó su andadura como profesor de la Universidad de Leiden, empeñado en montar un laboratorio versátil que permitiera investigar todas las áreas de la física. A partir de 1906 el laboratorio pasó a estar focalizado en física de bajas temperaturas, lo que se tradujo en que su hegemonía en este campo de investigación fue absoluta. El físico montó una auténtica factoría del frío. Su imperiosa necesidad de tener los mejores artesanos y técnicos le hizo organizar una escuela en su propio laboratorio para formar, por ejemplo, a los mejores sopladores de vidrio. Con el tiempo, su trabajo se repartió entre la investigación y la coordinación de un gran equipo (ver fotografía), siendo un precursor de las grandes instalaciones científicas que se gestaron durante el siglo XX.

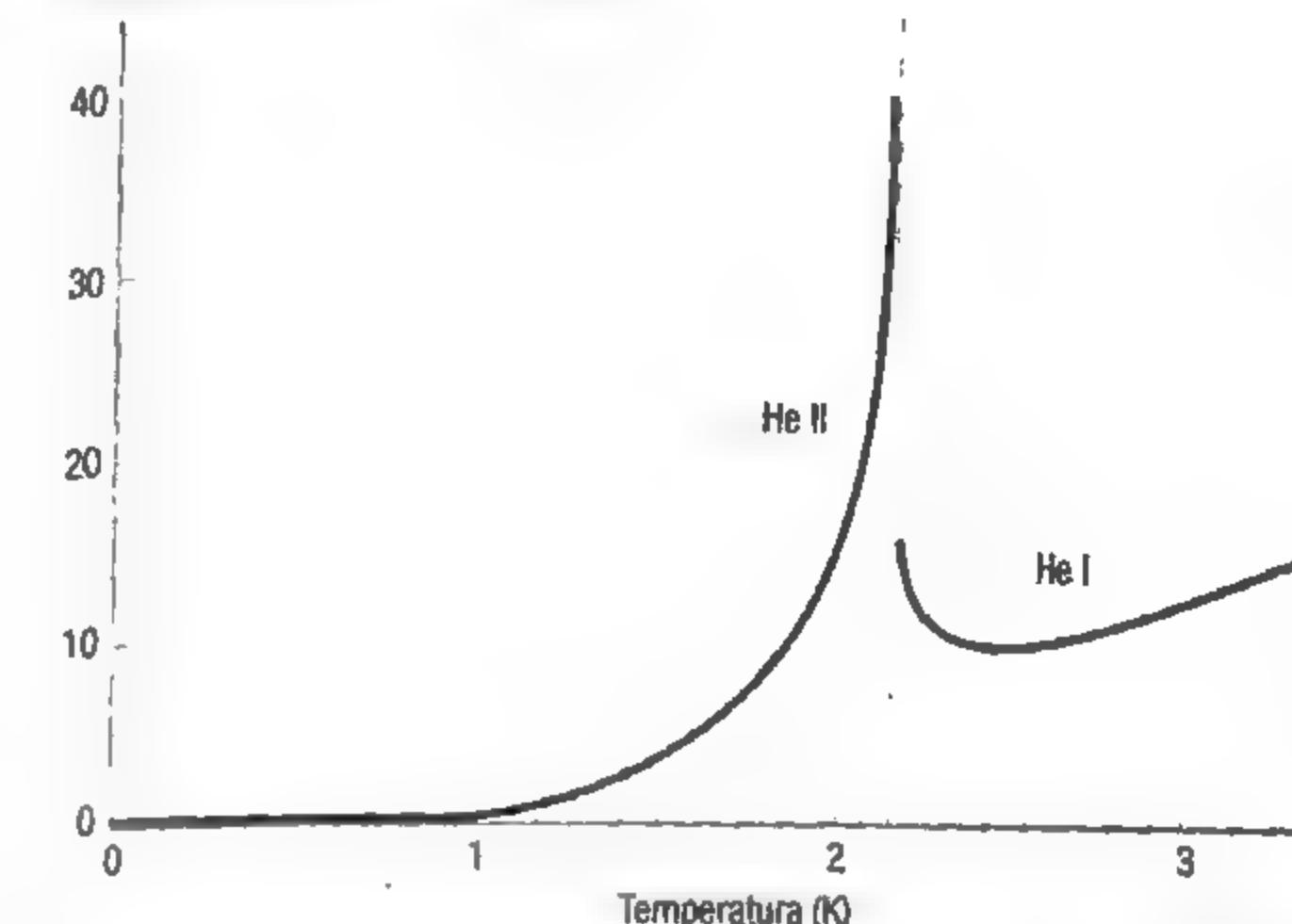
El triunfo, de la mano del helio

Sin duda, su mayor logro fue la licuefacción del helio, lo que consiguió utilizando una técnica de cascada. En cada paso del proceso, un gas que había licuado previamente se utilizaba para enfriar el siguiente elemento el cual, una vez licuado, se dejaba expandir a baja presión para conseguir temperaturas menores y poder licuar el siguiente. En la cascada el orden era el siguiente: el clorometano, que bajaba a -9°C , el etileno, a -140°C , el oxígeno, con el que se disminuía a -180°C , el hidrógeno, a -250°C y finalmente el helio. El hidrógeno fue licuado previamente por su gran competidor, el físico escocés James Dewar (1842-1923), en 1898, con lo que parecía que la carrera para licuar los gases había terminado. Sin embargo, en 1895 el químico escocés sir William Ramsay (1852-1916) consiguió obtener helio en determinados minerales terrestres, lo que permitió a Kamerlingh Onnes retomar la carrera del frío absoluto y ganarla, al licuarlo en 1908. Tras este hito, su laboratorio fue el único en el que podía encontrarse helio líquido, lo que le permitió realizar múltiples experimentos y descubrir la superconductividad.



Kamerlingh Onnes, sentado en el centro, aparece en la imagen flanqueado por W. Kowalsky (izquierda) y W.H. Keesom (derecha) y de pie, de izquierda a derecha, M. Wilhelms, J. Fins y L. Vegard.

FIG. 2
Capacidad calorífica del helio ($\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$)



Punto lambda. Representación de la capacidad calorífica del helio a temperaturas de hasta 3 kelvin. A la temperatura de 2,17 K el comportamiento cambia abruptamente. Es por debajo de esta temperatura donde aparecen comportamientos de superfluído.

traron que la viscosidad del helio desaparecía pero ¿qué significa exactamente eso? Ya hemos visto que un líquido fluye con más facilidad cuando no es viscoso: el agua que cae por una pendiente se acelera por la gravedad y se frena tanto por la resistencia que ofrece el suelo como por la resistencia que ejercen unas capas de líquido sobre otras. La miel, en una pendiente de pocos grados, tardará tanto en deslizarse que nos parecerá una eternidad. La lava de un volcán, que es pura roca fundida, avanza tan despacio que en la falda de la montaña podemos escaparnos de ella paseando. El helio, sin embargo, no presenta ninguna resistencia a su propio movimiento, de modo que si empieza a fluir... Sencillamente continúa haciéndolo, de forma similar a como circulaba eternamente la corriente eléctrica en un superconductor.

Una de las propiedades más espectaculares que presenta el helio superfluído, también denominado *He II*, es lo que llamamos

EL HE 3 Y EL ARMAMENTO NUCLEAR

El helio es un elemento que fue descubierto a finales del siglo XX estudiando la luz del Sol. Algo más tarde se observó que había importantes cantidades de helio en los pozos de gas natural, que son la fuente más habitual de helio. Nos referimos a su isótopo normal y corriente, dos protones, dos neutrones y dos electrones, el denominado He 4. Este tiene un parente cercano, un isótopo, con un neutrón menos llamado He 3. Curiosamente, aún siendo casi idéntico, el tener un neutrón menos hace que sea completamente diferente: el átomo de He 4 es un bosón, mientras que el de He 3 es un fermión. Eso y el hecho de que tenga propiedades muy diferentes lo hace fascinante para los investigadores. La abundancia de este isótopo es bajísima y no se encuentra de forma natural. Sin embargo, resulta ser un subproducto de los reactores nucleares y de las factorías en las que se fabrican armas nucleares.

El tritio, en desuso

El tritio, formado por un protón y dos neutrones, se utiliza en la elaboración de armas nucleares, lo que hace que se produzca y se guarde para tener garantizada la producción de estas armas. Lo que ocurre es que el tritio es radiactivo y decae con una vida media de 12,3 años en He 3. Esto significa que los grandes depósitos de tritio cada 10 años o así tienen una gran cantidad de He 3. Ese es el único He 3 que tenemos para investigar, para lo cual hay que retirarlo de los contenedores. Esta forma de producirlo tan *sui generis*, como subproducto de bombas nucleares, hace que hoy día haya una producción tremadamente baja. De hecho, el tritio ya se dejó de utilizar en 1988, lo que hizo que la cantidad de He 3 producida en el mundo sea hoy día ridícula. La escasez de He 3 tiene además una consecuencia peligrosa: desde

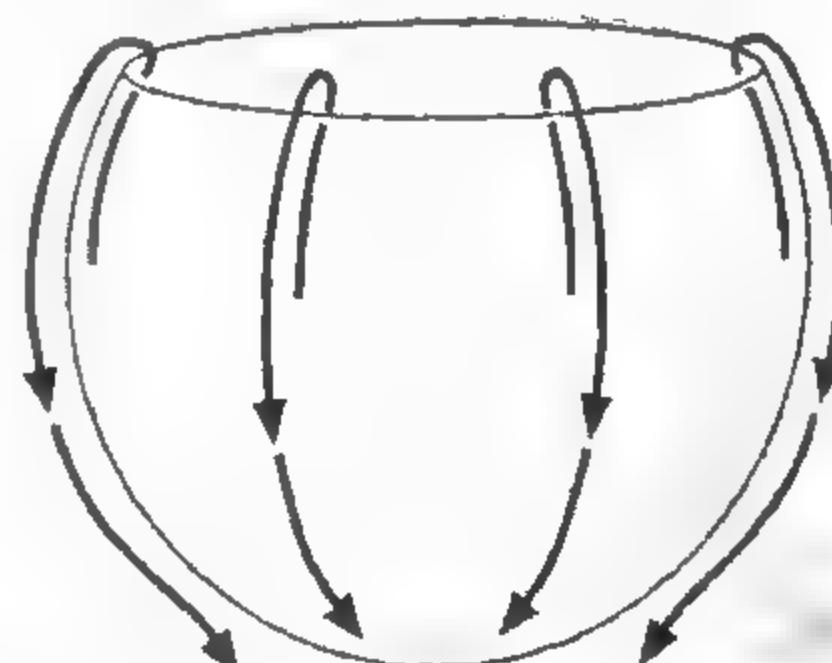
los atentados del 11 de septiembre de 2001 acaecidos en Nueva York, el Gobierno estadounidense instaló detectores de neutrones que funcionan a base de He 3 para detectar cargamentos piratas de plutonio.

El tritio es un isótopo radiactivo del hidrógeno que es producido de forma natural por los rayos cósmicos, simulados en esta imagen.



efecto Onnes (figura 3): en ese estado, el helio tiene la capacidad de fluir ¡hacia arriba! por las paredes verticales del recipiente que lo contiene. Veamos por qué ocurre esto, pero antes lo compararemos con un líquido común. Cuando un líquido como el agua se vierte en un recipiente, la superficie de contacto con las paredes forma un menisco que se levanta sobre el nivel del líquido hasta alcanzar una altura a la que se equilibran las fuerzas que actúan sobre él: la gravedad, la tensión superficial del líquido, la interacción con las paredes y la propia resistencia del líquido al movimiento, o lo que es lo mismo: la viscosidad. Esta característica del agua y otros líquidos provoca que, introducidos en un tubo de pequeño diámetro, sean capaces de ascender hasta una cierta altura. Es lo que llamamos *capilaridad* y es el fenómeno responsable de que la savia bruta de las plantas pueda ascender de las raíces hasta las hojas. En el helio superfluido el efecto es similar pero mucho más espectacular. En este caso la viscosidad es cero, de modo que cuando el superfluido toca la pared, la mera interacción con ella basta para levantar una capa microscópica de helio de unos 30 nm de espesor, llamada *película de Rollin*, que subirá y subirá sin detenerse, hasta encontrar una salida o incluso dar la vuelta entera al recipiente, en el caso en que esté cerrado, mojando su techo. Es decir: el único modo de

FIG. 3



Efecto Onnes: el superfluido escapa de su contenedor y moja la superficie sobre la que se apoya este último.

contener al helio superfluido es encerrándolo completamente pues, de otro modo, fluiría por todas las paredes hasta encontrar una abertura por la que salir... ¡Aunque no pareciera estar a su alcance!

Relacionado con este comportamiento también se observa otro igualmente sorprendente. Si ponemos a girar un superfluido resultará que, para determinadas velocidades angulares, el

superfluido no se frenará. Comparémoslo con un café. Si comenzamos a remover el líquido con una cuchara veremos que este último comienza a girar solidariamente con la cuchara. Si en cualquier momento sacamos la cuchara, el líquido seguirá girando hasta que finalmente se detenga. En el caso de un superfluido hay determinados valores de la frecuencia de rotación que son particularmente estables: si hacemos girar el superfluido

do con una de estas frecuencias, aunque saquemos la cuchara la rotación continuará indefinidamente.

Otra propiedad interesante que presenta el He II y que tampoco puede explicarse mediante modelos clásicos es su altísima conductividad calorífica. De forma similar a lo que ocurre con la conductividad eléctrica, son los electrones de valencia de un material los que transmiten principalmente el flujo de calor por conducción. En el helio no hay electrones de este tipo, por lo que hay que recurrir necesariamente a otra explicación del fenómeno. En este caso, el calor se transmite mediante ondas mecánicas análogas a las del sonido, de ahí que su propagación sea más rápida que mediante la difusión térmica habitual. Este efecto, por supuesto cuántico, se denomina «segundo sonido» y dispara la conductividad térmica del helio hasta cientos de veces el valor del cobre o la plata, siendo así la sustancia con la mayor conductividad calorífica conocida.

Como hemos visto, la característica esencial del helio a bajas temperaturas es que sus propiedades no pueden entenderse en

modo alguno sin recurrir a la física cuántica. Más aún, en estas páginas nos hemos centrado en explicar las propiedades de su isótopo más común, el He 4, pero también existe en la naturaleza —si bien en cantidades relativamente minúsculas— un isótopo con solo un neutrón en su núcleo, el He 3, que se comporta de forma diferente y no se convierte en superfluido sino alcanza una temperatura próxima a dos milésimas de kelvin, ¡dos mil veces menor que los 2,17 K del He 4! De nuevo, la física clásica, para la que la única diferencia entre ambos isótopos es su masa, se ve incapaz de explicar esta diferencia abismal. Más adelante veremos con detalle cuál es la propiedad que distingue tan ferozmente al He 4 del He 3.

El experimento [con el mercurio] no dejó lugar a dudas de que, dentro de la precisión de las medidas, la resistencia cayó a cero.

Al mismo tiempo, sin embargo, algo inesperado ocurrió. La caída no fue gradual, sino abrupta.

KAMERLINGH ONNES

do con una de estas frecuencias, aunque saquemos la cuchara la rotación continuará indefinidamente.

Otra propiedad interesante que presenta el He II y que tampoco puede explicarse mediante modelos clásicos es su altísima conductividad calorífica. De forma similar a lo que ocurre con la conductividad eléctrica, son los electrones de valencia de un material los que transmiten principalmente el flujo de calor por conducción. En el helio no hay electrones de este tipo, por lo que hay que recurrir necesariamente a otra explicación del fenómeno. En este caso, el calor se transmite mediante ondas mecánicas análogas a las del sonido, de ahí que su propagación sea más rápida que mediante la difusión térmica habitual. Este efecto, por supuesto cuántico, se denomina «segundo sonido» y dispara la conductividad térmica del helio hasta cientos de veces el valor del cobre o la plata, siendo así la sustancia con la mayor conductividad calorífica conocida.

Como hemos visto, la característica esencial del helio a bajas temperaturas es que sus propiedades no pueden entenderse en

Bosones condensados y electrones apareados

En el mundo subatómico —también— hay una gran diferencia entre estar solo y estar acompañado. En algunos casos sucede que el comportamiento de las parejas es radicalmente diferente al de cada uno de los miembros por separado.

Para entender el fenómeno que subyace en la aparición de la superconductividad nos convendrá recordar algunas nociones de física atómica y refrescar las distintas partículas que pululan a escalas del angstrom, la unidad de longitud «natural» que equivale a 0,000000001 metros. En esta escala, la partícula de referencia es el átomo, una estructura estable formada por un núcleo cargado positivamente, rodeado de una suerte de nube de electrones que danzan a su alrededor. En la imagen más clásica, este baile de los electrones se asemejaría a las órbitas que realizan los planetas alrededor del Sol. La diferencia estriba en que los electrones no se mantienen ligados al núcleo atraídos por la fuerza gravitatoria, sino gracias a la fuerza electromagnética que aparece entre cargas de distinto signo. No solo eso, el movimiento de los electrones es más complejo que el de los planetas del sistema solar debido a que las distancias y velocidades de estas partículas dentro del átomo son tales que entra en juego la mecánica cuántica. De hecho, los electrones solo pueden «girar» en algunas órbitas de energías muy particulares, estando cualquier otra energía estrictamente prohibida. Pero para la discusión que nos traemos entre manos basta

saber que el núcleo del átomo es muchísimo más pesado que los electrones, unas diez mil veces más, y que, en consecuencia, tiene una dinámica mucho más lenta y predecible. Del mismo modo que podemos estudiar el movimiento de los planetas alrededor del Sol suponiendo, en una primera aproximación, que este último está en reposo, en física atómica se estudia el movimiento posible de los electrones alrededor de un núcleo que imaginamos quieto, clavado en el origen de nuestras coordenadas.

Los electrones son fermiones. Esta afirmación implica un determinado tipo de comportamiento colectivo cuando dos o más electrones se encuentran cerca. Decir que una partícula como el electrón es un bosón o un fermión sería algo así como afirmar que una persona es callada o habladora, algo que en realidad solo podremos saber cuando esta se halle junto a alguna otra persona. Si solo hay una partícula, lo mismo da que sea bosón o fermión, del mismo modo que el que una persona sea callada o habladora solo se pondrá de manifiesto cuando haya al menos otra con la que hablar. El comportamiento diferenciado de bosones y fermiones es más y más marcado si aumentamos el número de partículas y las enfriamos, obligándolas a ocupar niveles bajos de energía. Hasta donde sabemos, los electrones son partículas indistinguibles: no hay nada que nos permita diferenciar un electrón de otro. La distinguibilidad, por otra parte, es una propiedad que depende de la escala a la que observemos las cosas. De igual modo que cuesta distinguir un macaco de un bebé humano a doscientos metros o incluso a menos distancia, dos átomos también pueden ser descritos como indistinguibles si no somos capaces de resolver su estructura individual. Los electrones son fermiones, decíamos, en contraposición al otro tipo posible de comportamiento colectivo, el de los bosones. Todas las partículas que pueblan el mundo atómico y subatómico son necesariamente o bosones o fermiones. Ejemplos notables de fermiones son el electrón, el protón, el neutrón y, quizás más desconocidos, los quarks. Por contra, el bosón sin duda más famoso y mediático es el bosón de Higgs, cuya existencia predijo el físico británico Peter

Higgs en los años sesenta y que fue confirmada por el CERN en 2012. Aunque también hay otros bosones menos conocidos entre el público general, por ejemplo el pion, el gluon, el fotón y el gravitón. Estos últimos son las partículas responsables de transmitir —en cierta manera— las fuerzas fundamentales de la naturaleza, en concreto la fuerza nuclear fuerte, y las interacciones electromagnética y gravitatoria, respectivamente. Entre las partículas que hemos mencionado las hay compuestas, como el neutrón, el protón y el pion, que están hechos de quarks, y otras sin estructura interna conocida, como el gluon, el electrón y el fotón.

¿FERMIOS O BOSONES?

La diferencia entre ser un bosón o un fermión solo se pone de manifiesto, como hemos comentado, al poner juntas varias partículas de la misma clase. Utilizando una analogía (siempre peligrosas y por tanto fascinantes), podríamos describir cómo se comportaría un grupo de individuos si fueran indistinguibles, es decir, que tanto podrían ser bosones como fermiones, a la hora de llenar un teatro. Considerando las tres posibilidades (distinguibles, indistinguibles-fermiones e indistinguibles-bosones), el caso de que todos sean distinguibles es el más parecido a lo que nos ocurre en nuestro mundo cotidiano, en el que siempre podemos diferenciar las cosas por muy similares que sean.

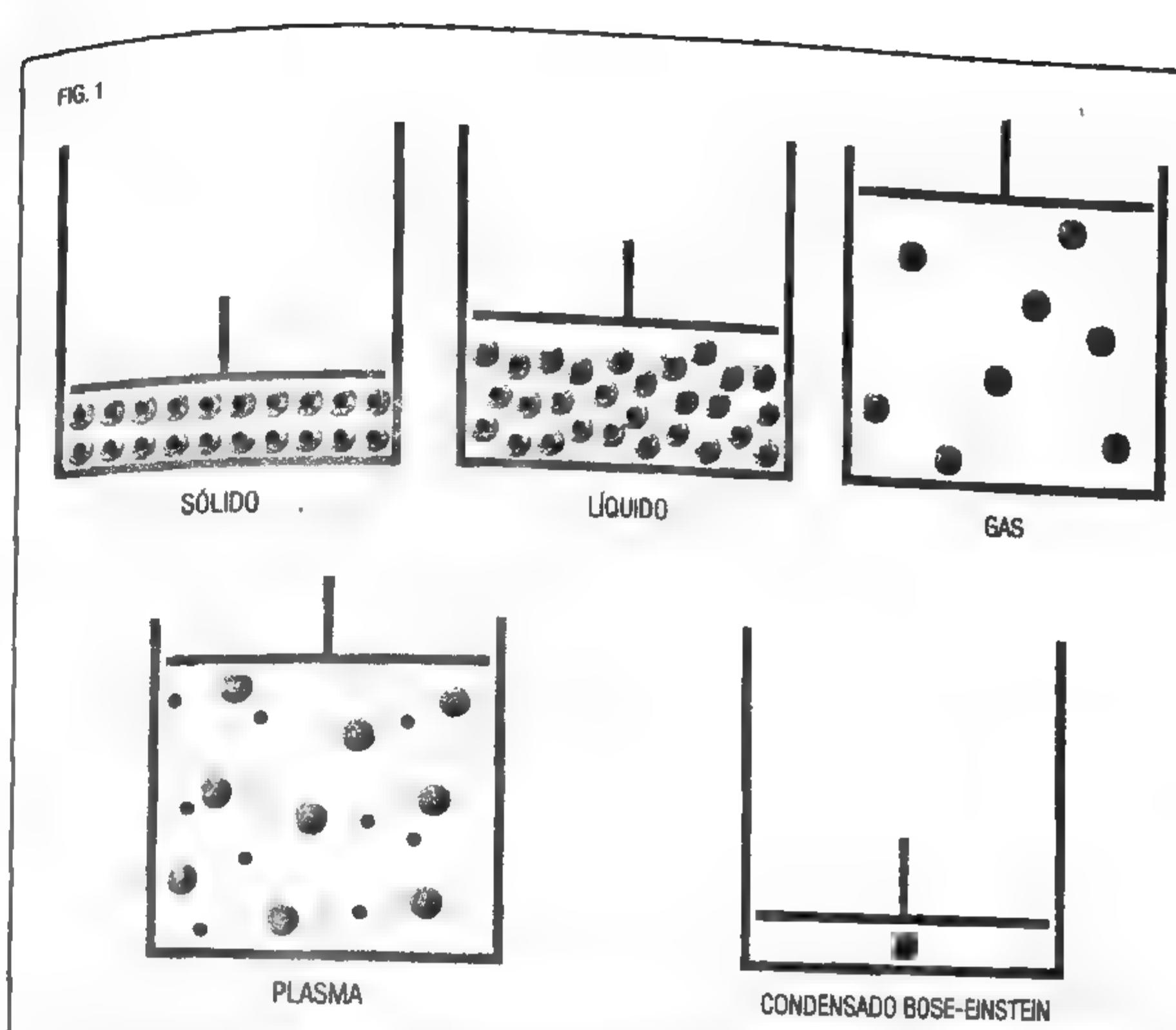
Imaginemos el típico teatro bien construido, con sus filas de butacas situadas sobre una pendiente ascendente, de forma que las primeras filas están más cerca del escenario y más abajo en altura, mientras que las filas posteriores están a mayor altura para facilitar la visión a los espectadores. En este marco, supongamos ahora que hacemos entrar un público íntegramente compuesto de individuos distinguibles. Estos irán situándose en la parte más baja de la platea y, poco a poco, irán ocupando los sitios libres que vayan encontrando, comenzando por abajo y subiendo a medida que no queden plazas vacantes. En el caso de que se hallen a una temperatura no

muy baja (recordemos que la temperatura da una medida de cuánto se mueven), los individuos en cuestión no ocuparán todos los huecos ordenadamente, por lo que quedarán algunas pocas butacas libres. Pero si disminuimos la temperatura, irán llenando estrictamente todos los huecos, desde la butaca más baja y en sentido ascendente de alturas y, por tanto, de energías potenciales. Nunca se sentarán dos en la misma butaca. Y es que, si llegaran a contactar físicamente, la repulsión electromagnética existente entre ellos evitaría que pudieran ocupar el mismo espacio.

¿Qué diferencia hay en el caso de que sean solo bosones? Si lo fueran, tenderían a estar juntos. Intentarían sentarse todos ellos en las butacas inferiores y, curiosamente, lo conseguirían. Para ser más precisos, en «realidad» conseguirían sentarse todos juntos pero, en caso de interactuar entre ellos, lo resolverían haciendo que la butaca fuera más grande. Este fenómeno es la denominada *condensación de Bose-Einstein*. Los bosones pueblan todos el mismo estado cuántico pero, al haber interacción entre ellos, este estado es bastante más grande que el que poblaría un solo bosón. De hecho, los bosones formarían una suerte de gran bosón que estaría formado por todos ellos, un estado conocido como *condensado de Bose-Einstein* (figura 1).

¿Y si fueran fermiones? Los fermiones entrarían en el teatro y se comportarían en esta analogía de forma muy similar a los individuos distinguibles. Irían llenando el anfiteatro comenzando por abajo y sin dejar huecos ni ocupar dos de ellos una misma butaca. La diferencia fundamental con el caso de los distinguibles es que, en el caso de los fermiones, no se debe a que interactúen entre sí, sencillamente es su naturaleza la que no les permite a dos de ellos ocupar el mismo estado.

Dejemos atrás la analogía y volvamos al átomo. Los niveles atómicos son, de alguna manera, como las diferentes filas de butacas. Los electrones son indistinguibles excepto por una propiedad, el espín, una propiedad física de las partículas elementales que determina su momento angular intrínseco, que en el caso del electrón solo puede tomar dos valores, «arriba» y «abajo». Por este motivo, los electrones pueden ir llenando los niveles ató-



Las partículas de tipo bosón se agrupan de distinta forma (más o menos juntas) según el estado de la materia. Pero al formar un condensado de Bose-Einstein todas ellas forman una suerte de partícula única.

micos de dos en dos. Dos en el nivel más bajo —uno apuntando hacia arriba y otro hacia abajo—, dos en el siguiente, y así sucesivamente. Cada nivel tiene una energía superior, por lo que un átomo que contenga muchos electrones, como por ejemplo los que conforman elementos como el oro o el uranio, tendrá algunos electrones con mucha energía. Si, por contra, los electrones fuesen bosones en lugar de ser fermiones, todos se situarían en el mismo nivel, el de energía más baja, dando lugar a un átomo con muy poca energía total. Veamos qué significa esto en términos numéricos. Imaginemos un átomo con solo dos niveles disponibles, uno de energía uno y otro de energía dos. No importa ahora

en qué unidades estamos midiendo la energía, centrémonos en las magnitudes relativas. Si tenemos cuatro fermiones, se colocarán dos en el nivel uno y dos en el nivel dos. La energía del átomo será $1 + 1 + 2 + 2 = 6$. Si tuviésemos bosones todos se irían al nivel de menor energía y la energía del átomo sería $1 + 1 + 1 + 1 = 4$. Esta disparidad, que ya es apreciable, sería mucho mayor si tuviésemos más partículas.

Condensación de Bose-Einstein y superfluidez

Como ya hemos descrito, los bosones se distinguen de los fermiones por su tendencia a juntarse. Más aún para ser más precisos, los bosones en realidad lo que quieren es ir «todos a una».

Esto tiene consecuencias profundas, veamos porqué. Imaginemos que tenemos un cazo lleno de agua y queremos que el líquido comience a rotar. En nuestro devenir diario lo que haríamos sería introducir un cucharón de madera y comenzar a dar vueltas, intentando arrastrar el líquido, invitándolo a girar. Inicialmente solo desplazaremos una fracción pequeña del líquido y luego, poco a poco, una mayor parte del mismo se irá uniendo hasta que todo el líquido rotará de forma más o menos uniforme. Recordemos que en el mundo macroscópico habitual en el que nos movemos podemos hacer que el agua rote tan poco como queramos, dependerá de la velocidad angular con la que giremos el cucharón.

El mismo experimento realizado en un condensado de Bose-Einstein, es decir, en un imaginado cazo lleno de bosones con su cucharón correspondiente, nos lleva a un fenómeno completamente diferente. En el condensado todos los átomos hacen siempre la misma cosa. Antes de meter la cuchara, los bosones estarán en el estado de más baja energía del sistema, es decir, en reposo en el fondo del cazo. Si ahora comenzamos a girar la cuchara ¿qué ocurrirá? Siguiendo el ejemplo cotidiano, deberíamos

La condensación de Bose-Einstein es uno de los fenómenos más intrigantes predichos por la mecánica estadística cuántica.

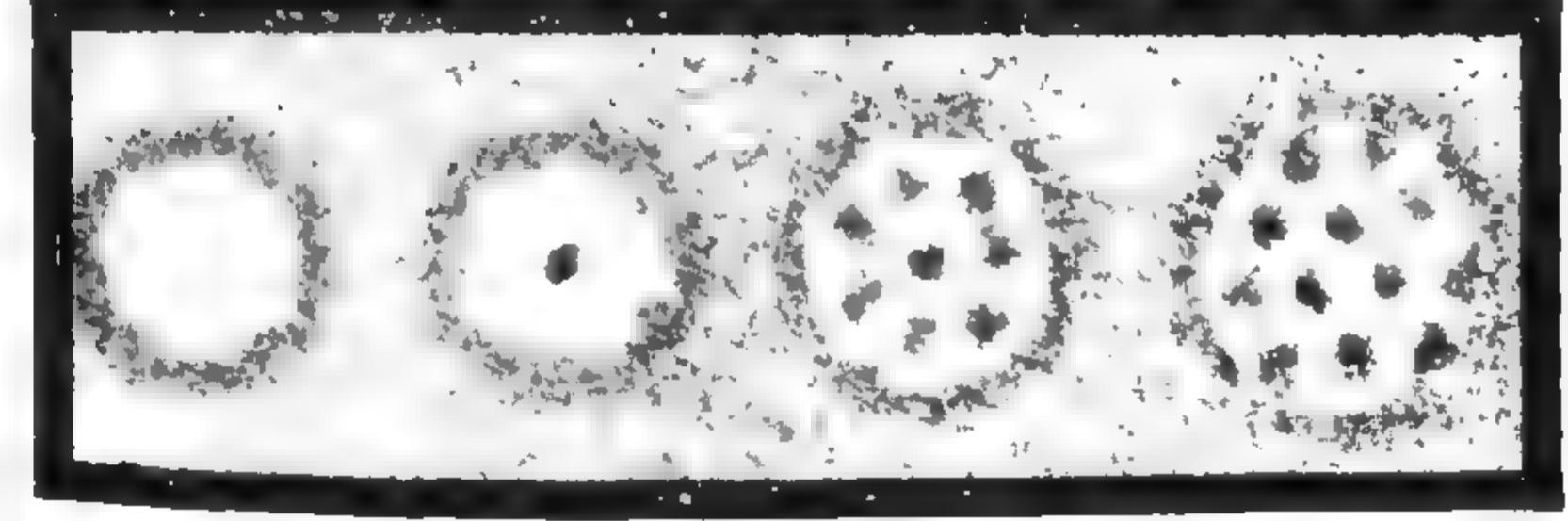
WOLFGANG KETTERLE

FORMACIÓN DE VÓRTICES EN CONDENSADOS

Para entender desde un punto de vista microscópico qué ocurre cuando revolvemos con una cuchara un condensado de Bose-Einstein se han realizado experimentos en laboratorios de gases ultrafrios. En particular destacan los encabezados por el físico Jean Dalibard (n. 1958) en la Ecole Normale Supérieure de París en el año 1999. En sus experimentos utilizaron átomos de rubidio-87, que enfriaron a temperaturas del orden del microkelvin, mientras con un láser iban girando el gas. En este contexto el láser hace las veces de la cuchara que usamos para remover el café. Una vez que el sistema se ha estabilizado se deja escapar el gas ultrafrio de manera que este se expande rápidamente —los átomos vuelan libres— para después ser fotografiados (ver imagen). Al expandirse, los átomos hacen que lo que ocurría a escalas microscópicas pueda ser observado a escalas mayores con instrumentos ópticos. El efecto es similar al de inflar un globo con un dibujo de una oveja, a medida que el globo aumenta de tamaño, también crece la oveja sobreimpresa en el globo, manteniendo muchas de sus propiedades —seguimos reconociendo a la oveja primigenia—.

Zonas oscuras en el interior de los átomos

Al observar estas fotografías, Dalibard y sus colegas vieron que se formaban zonas oscuras dentro de la nube atómica, regiones donde casi no había átomos. Las interpretaron como zonas de gran vorticidad. Al igual que en el caso del torbellino que se forma al dejar escapar el agua por el lavabo, en la zona del torbellino hay un vacío de líquido. Lo que observaron fue exactamente lo mismo, pero de origen cuántico. En el interior del gas, a medida que aumentaba la rotación, se observaban más y más torbellinos. Sin embargo, el gas no lograba a rotar como un todo. ¿En qué momento aparece la superfluidez, en el sentido de que todo el gas rote y se mantenga rotando indefinidamente? Pues cuando haya tantos torbellinos que puedan fusionarse generando un torbellino único, que es el gas completo en rotación.



Vórtices cuánticos en un condensado de Bose-Einstein en rotación. La velocidad de rotación del contenedor aumenta de izquierda a derecha. Se observa como a medida que aumentamos la rotación el número de vórtices en el condensado crece.

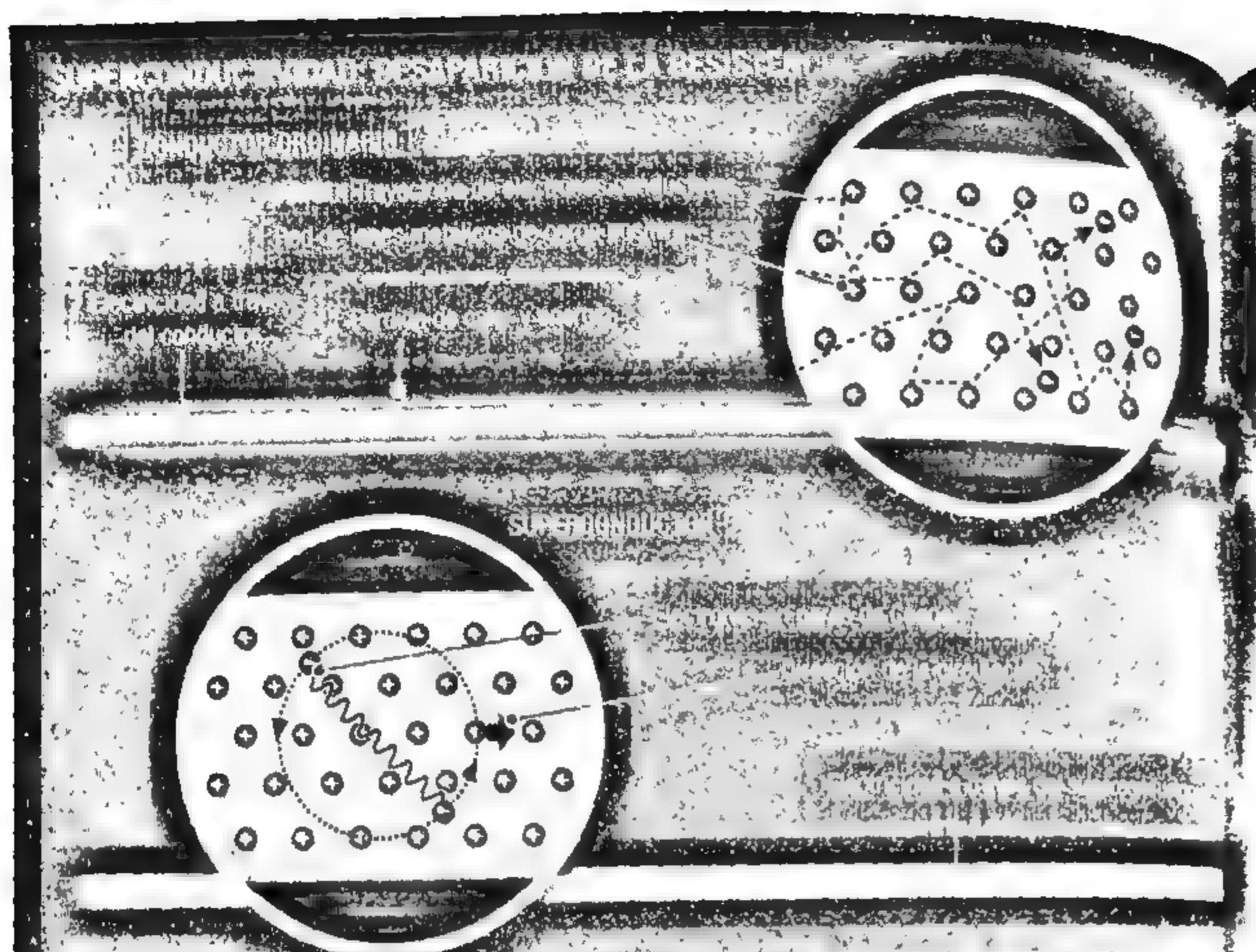
ir arrastrando algunos bosones y, poco a poco, estos pasarían de estar en reposo a rotar a la velocidad angular que estemos dándole a nuestra cuchara. Pero ¿es esto compatible con que estén formando un condensado de Bose-Einstein? La respuesta es que no. Si forman permanentemente un condensado, tienen que comportarse siempre como un todo, esto es, si uno rota, todos rotan, no hay medias tintas. Al mismo tiempo cabe recordar que la mecánica cuántica, en general, no deja que las variables del sistema puedan tomar cualquier valor. En este caso, la cuantización afecta a la cantidad de rotación. Cuánticamente el gas no puede rotar tan poco como queramos, hay un mínimo de rotación y, a partir de este, hay diversos valores posibles que puede tomar la frecuencia angular. Esto provoca que, para conseguir poner todo el condensado en movimiento, haya que girar la cuchara una cantidad determinada de veces, que, más o menos, es la que haría falta para hacer rotar a uno de ellos multiplicada por el número total de bosones. Esto hace que, si inicialmente no tenemos rotación, cueste bastante conseguir que rote todo el gas. También tiene una segunda consecuencia. ¿Qué ocurre si el condensado está en rotación?, ¿será fácil detenerlo? El mismo argumento nos dice que si queremos que el gas deje de rotar una vez que hayamos conseguido que lo haga, nos costará mucha energía detenerlo. Es más: de hecho, si conseguimos que rote, en principio podría seguir rotando indefinidamente.

Esta es la explicación microscópica de la superfluidez observada en el He 4 que hemos descrito anteriormente. Al bajar por debajo de una temperatura crítica de 2,172 K, en torno a un 10% de los átomos de He 4, que son bosones, pasan a formar un condensado de Bose-Einstein. De esta manera tenemos una suerte de mezcla de dos fluidos, uno condensado y otro normal, y como ya sabemos, a partir de ese momento las propiedades de rotación y fluidez son completamente distintas a las habituales. La parte superfluida del He 4 por debajo de 2,172 K a presión atmosférica es francamente sorprendente. En el momento en que una parte del líquido empieza a fluir, fluye todo, dando lugar al efecto *fuente*. Si una parte empieza a rotar, entonces rota todo el fluido, sin que aparentemente vaya a detenerse nunca. En cierto modo,

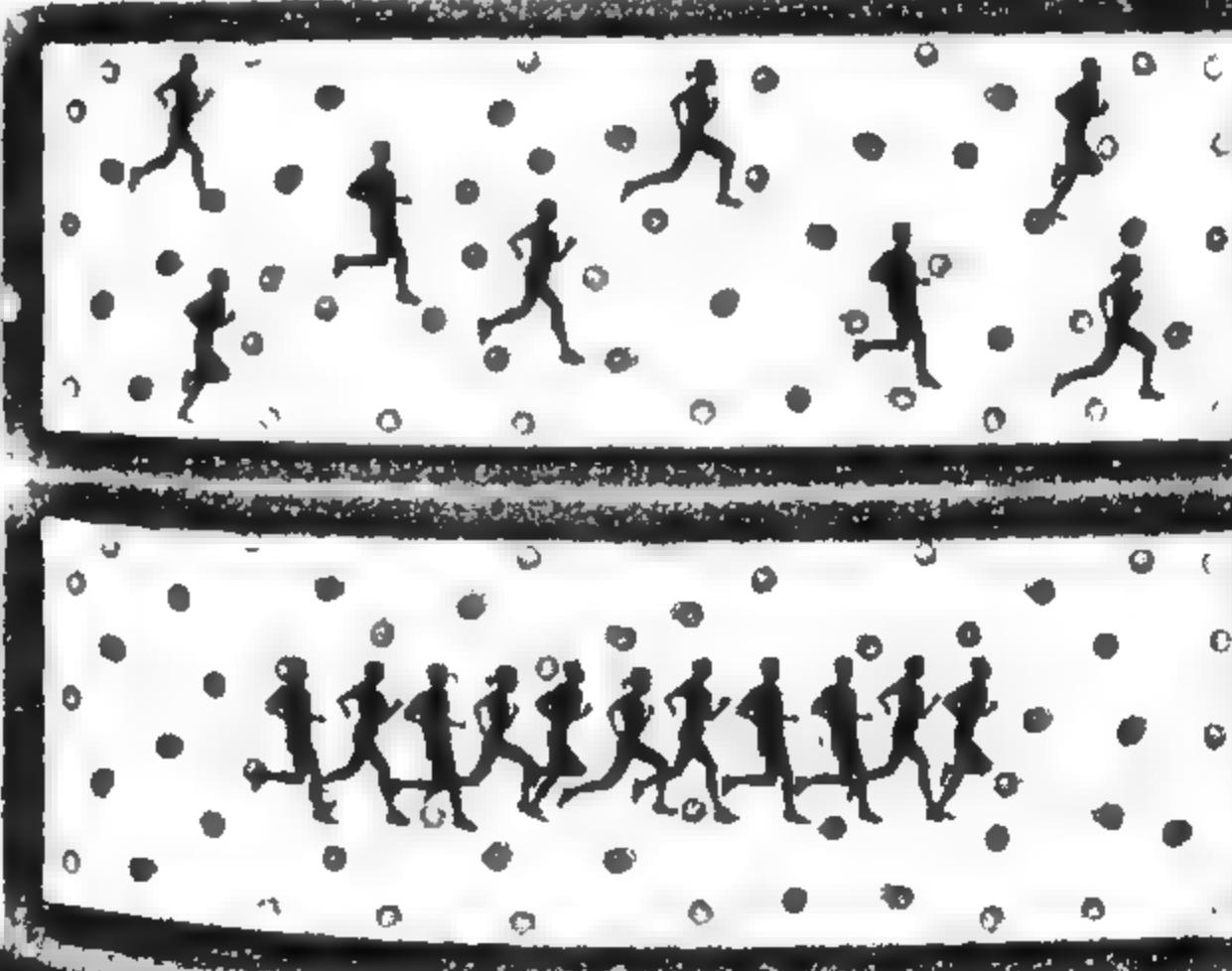
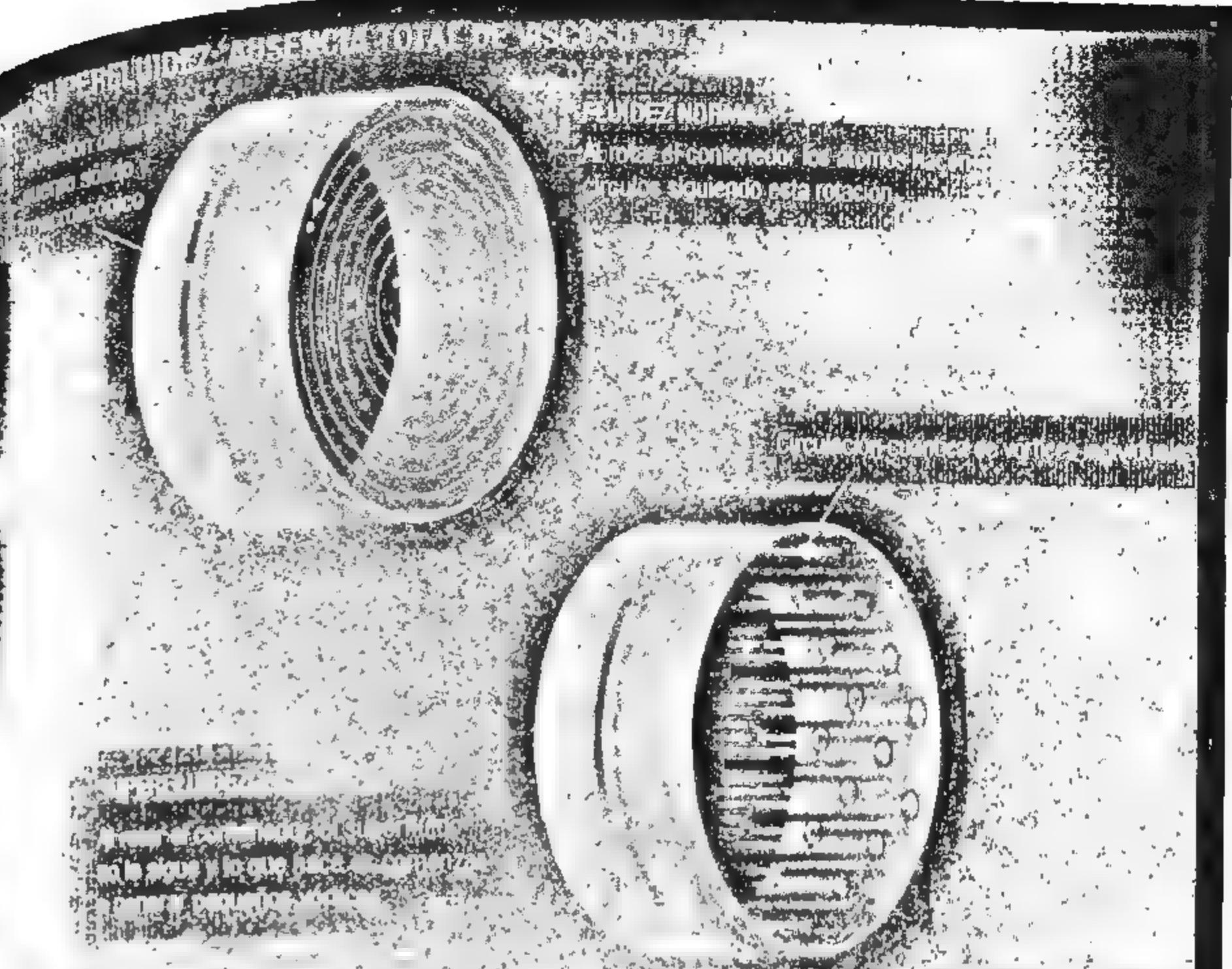
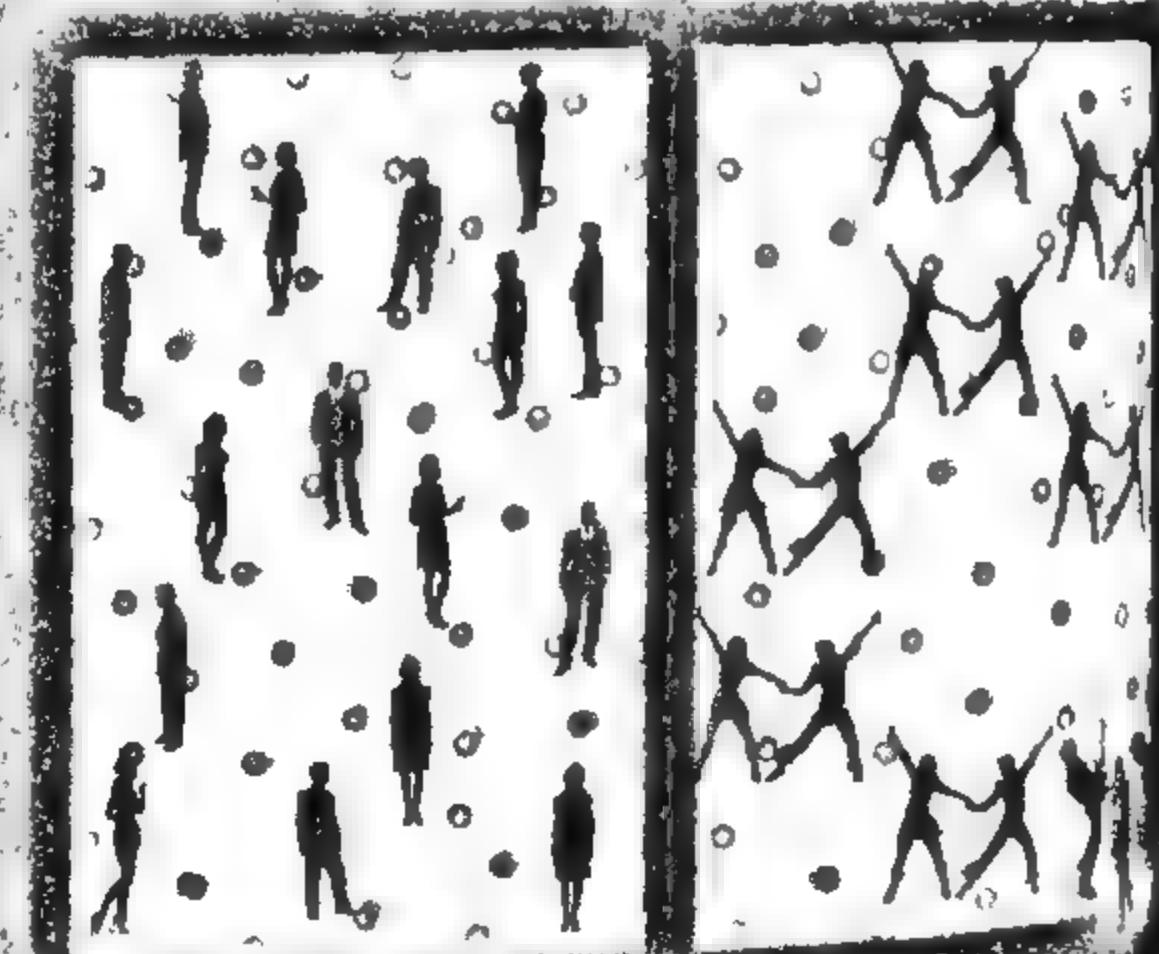
el superfluido se comporta como si estuviese formado por una gigantesca y extraña molécula.

La explicación que acabamos de dar de la superfluidez del He 4 es lo que se denomina una «interpretación microscópica». La idea de que los átomos de helio pudieran pasar a formar parte de un condensado de Bose-Einstein al bajar del punto lambda la formuló el físico teórico estadounidense Fritz London (1900-1954) el mismo año que Kapitsa, Allen y Misener publicaron sus resultados. La idea fue considerada muy controvertida en la época. Casi al mismo tiempo el físico húngaro-estadounidense László Tisza (1907-2009) propuso un modelo que consistía en entender el He 4 como la mezcla de dos fluidos, uno normal y el otro un superfluido. En su modelo, el superfluido estaba siempre a temperatura cero. Una de las predicciones más curiosas fue la existencia de un segundo sonido, observado experimentalmente más adelante. En contraposición a las ondas de sonido normales, que son ondas de presión, el segundo sonido eran ondas de temperatura. Curiosamente, el premio Nobel que laureó la explicación teórica de la superfluidez recayó en 1962 en el físico ruso Lev Landáu (1908-1968). Aunque Landáu no tuvo que utilizar ninguna teoría microscópica, lo que hizo fue deducir qué tipo de excitaciones podría haber en el helio superfluido, y de ellas obtuvo las propiedades básicas que se observan en la superfluidez.

El He 4 fue, de alguna manera, el primer condensado de Bose-Einstein que se consiguió sintetizar. Como hemos visto, en realidad no es un condensado propiamente dicho, sino una mezcla entre condensado y fluido normal. Para tener un condensado puro hubo que esperar unos 70 años. En 1995 un grupo de investigadores de la Universidad de Colorado en Boulder, Estados Unidos, liderado por los jóvenes físicos Eric A. Cornell y Carl Wieman, consiguió obtener un condensado compuesto de átomos de rubidio-87 a una temperatura de unos 200 nanokelvin. Esto es, unos nueve órdenes de magnitud —un uno seguido de nueve ceros— menor que la temperatura ambiente. En estos gases ultrafríos se está estudiando en detalle cómo aparece la superfluidez y qué va pasando exactamente cuando movemos



Al calor de un conductor normal, los electrones chocan constantemente con los iones metálicos que se encuentran en su camino. Debido a esa pérdida de energía que se traduce en aumento de temperatura, el calor es el caso de un material superconductor, el comportamiento es completamente distinto. Los electrones se unen en parejas formando pares de Cooper que a su vez, al ser bosones, pueden formar un condensado de Bose-Einstein. En este estado los electrones se comportan todos a una, como si fueran parejas de baile danzando al mismo ritmo. Esta unidad no se rompe a causa de la colisión con los iones metálicos y, por ello, la electricidad fluye sin perder energía.



Al calor de un conductor normal, los electrones libres libres se pueden unir a formar un sistema de partículas que pierde su viscosidad. Cuando los electrones libres son bosones, como en el He-4, al disminuir la temperatura por debajo de 2.172 K, una parte de los electrones pasan a formar un condensado de Bose-Einstein. En este estado todos los átomos se comportan como si fueran uno solo. Si uno fluye, todos fluyen, como si numerosos corredores basaran de correr cada uno a su ritmo a formar un grupo coordinado, lo que hace que el fluido pierda la viscosidad. En este estado el helio es capaz de subir por las paredes de su contenedor.

la cuchara por nuestro cazo lleno de bosones. En realidad, parece que lo que ocurre es que se van formando pequeños vórtices. Es decir, en el gas aparecen pequeños remolinos, idénticos a los que se forman al dejar escapar el agua de la bañera por el sumidero. Estos pequeños remolinos tienen una rotación del gas asociada pero solo en una región muy pequeña comparada con el tamaño del cazo. A medida que vamos removiendo el condensado, el número de pequeños vórtices va creciendo hasta que, de algún modo, al llegar a una frecuencia crítica se unen y dan lugar a que todo el condensado se mueva al unísono. La comprensión y el estudio experimental de las raíces microscópicas de la superfluidez están siendo explorados en detalle en estos laboratorios de átomos ultrafríos.

Los fermiones se unen en pares

Como ya vimos, el helio tiene dos isótopos que se comportan de forma diferente a bajas temperaturas. Aunque ambos son líquidos a presión atmosférica, incluso si los llevamos a temperaturas al borde mismo del cero absoluto, presentan comportamientos muy distintos. El He 4, cuyos átomos están formados por dos protones, dos neutrones y dos electrones, se comporta como un bosón. Al enfriarlo por debajo de 2,172 K, sus propiedades cambian de tal manera que pasa de denominarse He I a He II y, de hecho, pasa de tener un comportamiento más o menos normal de líquido a tener las propiedades de superfluído. La razón de su superfluidez la acabamos de describir más arriba: su comportamiento bosónico.

El otro isótopo del helio, el He 3, es un fermión en lugar de un bosón. Esto es debido a que sus átomos están formados por un número impar de fermiones, concretamente por un neutrón, dos protones y dos electrones. Esto, como ya hemos señalado, hace que a bajas temperaturas se comporte de un modo completamente diferente. En particular, sus propiedades se pueden entender en gran medida como si el líquido fuera lo que se denomina un *mar de Fermi*. Esto es un montón de fermiones

llenando un contenedor. Los fermiones llenan el recipiente de tal manera que, esencialmente, solo pueden moverse los que se hallan en estados de energía más alta, ya que son los únicos que están cerca de estados libres. En el símil del teatro, los fermiones situados cerca del escenario no pueden moverse, ya que para ello tendrían que pasar por butacas llenas —estados donde hay otros fermiones—, cosa que prohíbe el *principio de exclusión de Pauli*, formulado por el físico austriaco Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958) en 1925: *dos fermiones idénticos no pueden estar nunca en el mismo estado cuántico*. Así pues, son los fermiones sentados en la última fila los únicos que pueden subir a la siguiente, que está vacía, y desplazarse. Esta descripción sencilla capta en gran medida lo que realmente ocurre. De hecho, las propiedades básicas de cualquier mar de Fermi vienen dominadas por el comportamiento de esos fermiones que están en las últimas butacas, a las que se denomina *superficie de Fermi*.

Así se comporta el He 3 a bajas temperaturas, su comportamiento fermiónico explica casi todo lo que le ocurre. Como ya sabemos, hace falta bajar mil veces la temperatura respecto a la del He 4 para que el He 3 presente también un comportamiento superfluído, es decir hay que llegar a los 0,002491 K. Pero ¿no habíamos dicho que la superfluidez estaba relacionada con la condensación de Bose-Einstein? ¿Qué hace entonces que el He 3, que está compuesto por fermiones, presente un estado que es propio de bosones?

SUPERFLUIDEZ Y SUPERCONDUCTIVIDAD, DOS CARAS DE LA MISMA MONEDA

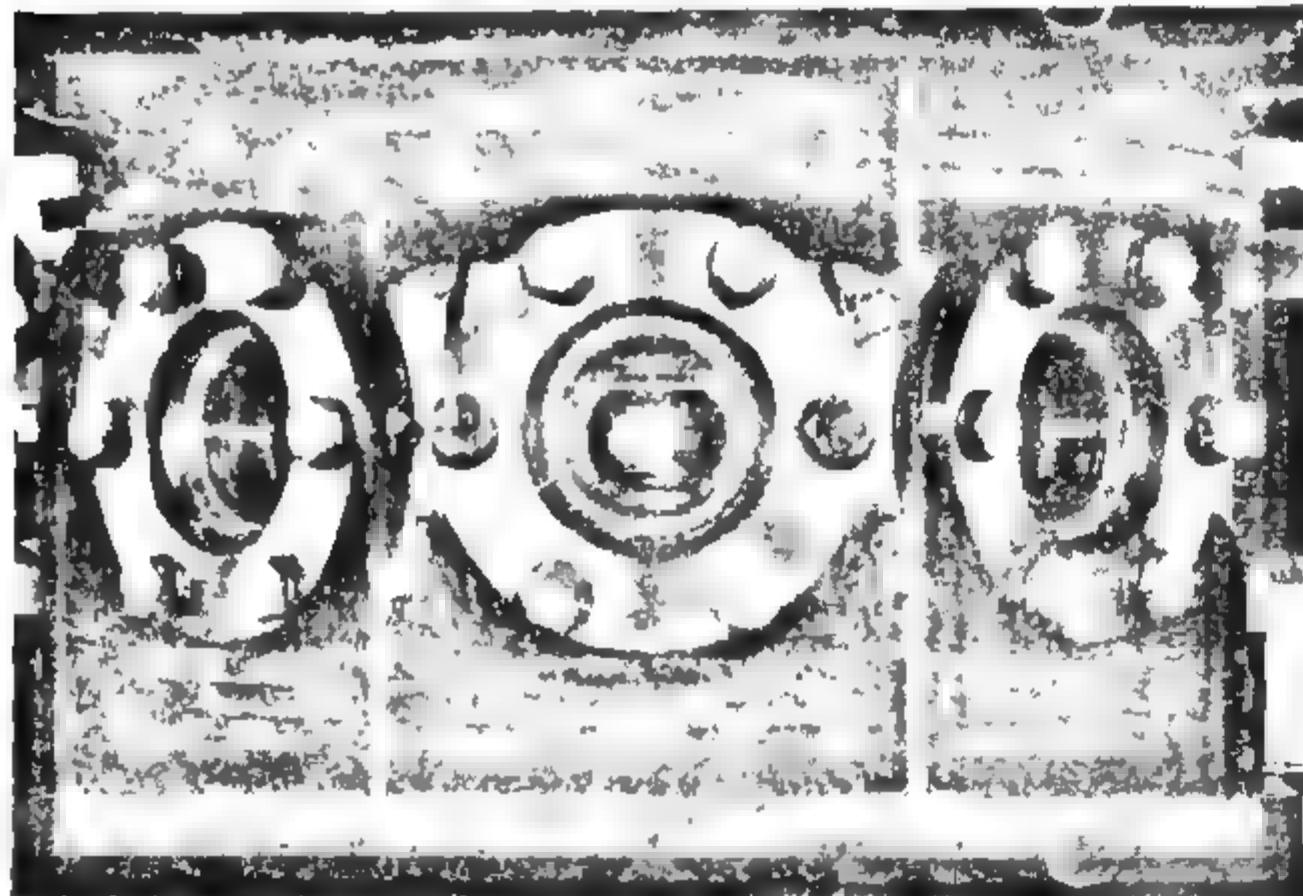
La razón por la cual el He 3 también pasa de ser un líquido cuántico de fermiones más o menos normal a comportarse como un superfluído al bajar la temperatura a 0,002491 K es fascinante y está muy relacionada con un comportamiento en apariencia distinto: la superconductividad observada en su tiempo por Kamerlingh Onnes al estudiar el modo en que la electricidad circulaba

MARES DE FERMI EN MINIATURA

El mar de Fermi es uno de los conceptos de física cuántica más curiosos. La mecánica cuántica nos dice que un sistema físico puede tener solo unas energías bien determinadas, por tanto, un fermión atrapado en una caja no puede tener cualquier velocidad. Si en lugar de un fermión tenemos varios del mismo tipo, no podremos tener dos que vayan a la misma velocidad. Esto hace que tengamos uno que va muy lento, el siguiente algo más rápido y así sucesivamente (ver figura). Esto tiene una consecuencia francamente interesante. ¿Qué ocurre, por ejemplo, si chocan dos fermiones que tienen velocidades bajas? Como les ocurre a las bolas de billar, al chocar elásticamente las bolas saldrán del choque con velocidades diferentes a las de entrada, pero conservando el momento lineal. Es decir que la suma —usando vectores— de los momentos de entrada ha de coincidir con la suma a la salida. Claro que, si en nuestro mar de Fermi los fermiones salieran del choque con velocidades bajas, ¡estas ya estarían ocupadas por otros fermiones! Esto hace que, en realidad, los únicos fermiones que pueden hacer algo «divertido», como hacer que uno, de repente, vaya más rápido, son los que están en la superficie de Fermi, que sería el nivel de energía más alto ocupado. Aunque parezca extraño estamos rodeados de mares de Fermi. De hecho los electrones de conducción de cualquier cable pueden actuar como tales gracias a que la superficie de Fermi cae justo a una energía en la que la red cristalina permite el flujo de electrones.

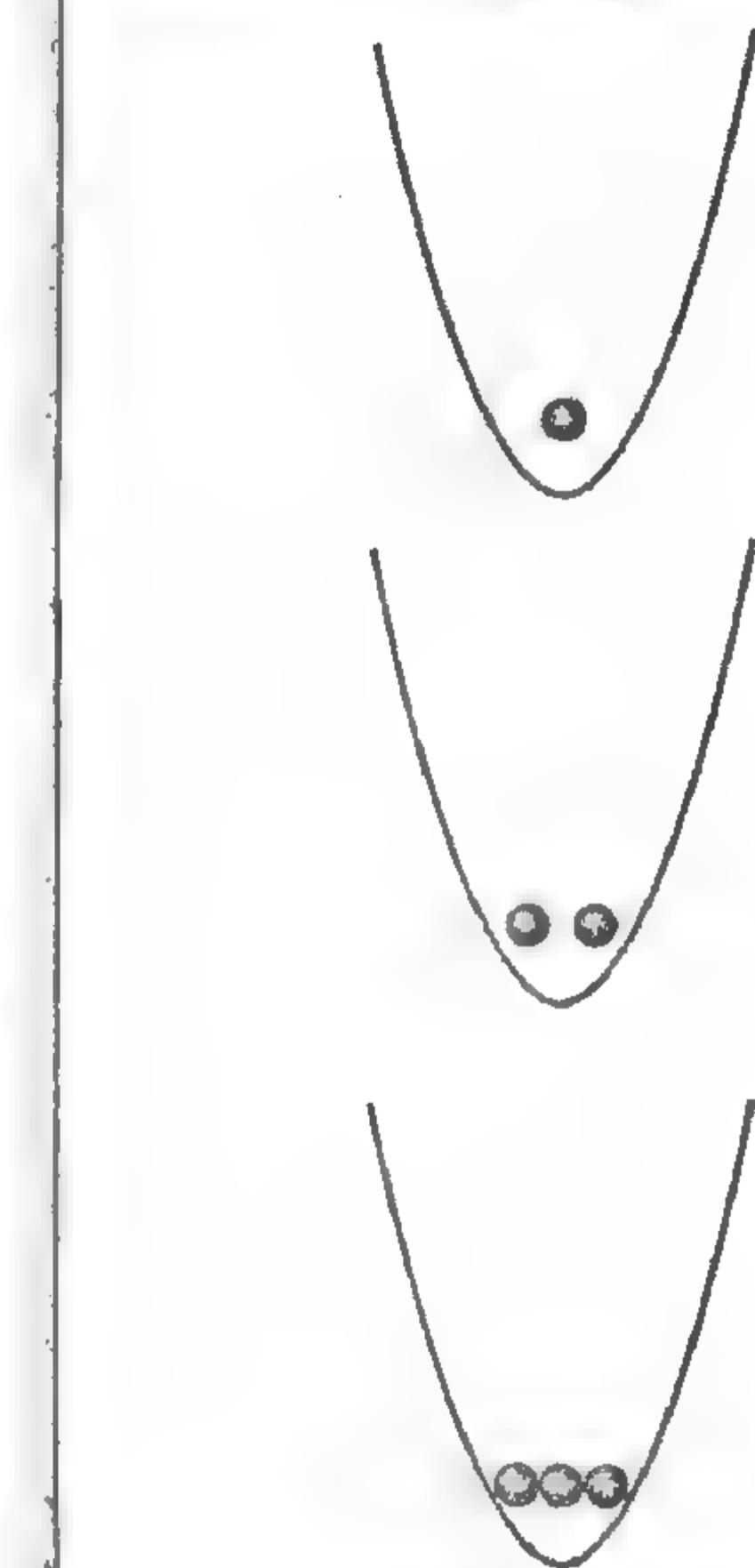
El mar de Fermi más pequeño posible

Recientemente se ha conseguido formar el mar de Fermi más pequeño jamás sintetizado. Se ha logrado en el grupo encabezado por el físico Selim Jochim de la Universidad de Heidelberg en Alemania, utilizando átomos de Li —que son fermiones— atrapados en una trampa armónica, que hace que los fermiones estén en una suerte de caja flotando en el vacío. En el experimento se fueron añadiendo fermiones uno a uno y se observó cómo se iban disponiendo: abajo un fermión muy lento, el siguiente algo más rápido y un tercero en la posición correspondiente, sintetizando de esta manera el mar de Fermi más pequeño posible.



Este dispositivo, conocido como trampa magneto-óptica o MOT por sus siglas en inglés (*Magneto-Optical Trap*) es el que usa Selim Jochim para obtener átomos a temperaturas muy bajas necesarios para sus experimentos.

BOSONES



FERMIONES



Condensado de Bose-Einstein
(pequeño)

Mar de Fermi
(pequeño)

La figura muestra diferentes formas de llenar un recipiente de bosones y fermiones si el sistema está cerca del cero absoluto y las partículas no interactúan entre sí. A la izquierda, los bosones van colocándose todos en el mismo estado de energía, que es el más bajo posible. A la derecha, en el caso de los fermiones, a medida que añadimos uno, este se irá colocando en un estado energético mayor. Esto es lo mismo que ocurre con los electrones del átomo.

a través del mercurio cuando su temperatura bajaba hasta los 4 K. Repasemos. En un caso tenemos He 3 líquido en un recipiente muy cerca del cero absoluto, en el cual sus átomos están básicamente formando un mar de Fermi. Por otro lado, sabemos que la conductividad del mercurio es debida al comportamiento de los electrones en el metal. De nuevo, los electrones son fermiones y al tener una masa muy pequeña siempre se pone de manifiesto su comportamiento cuántico, sin necesidad de bajar la temperatura, así pues también están formando un mar de Fermi. En el primer caso el mar lo componen los átomos de He 3 atrapados en un contenedor. En el segundo son los electrones inmersos en la red cristalina.

No puedo trabajar en buenas condiciones en los Laboratorios Bell. Mientras Walter (Brattain) y yo estamos resolviendo cuestiones relacionadas con los transistores de punto de contacto, Shockley se queda todos los problemas interesantes para sí mismo.

JOHN BARDEEN

componen los átomos de He 3 atrapados en un contenedor. En el segundo son los electrones inmersos en la red cristalina.

Los físicos John Bardeen, Leon Cooper, J. Robert Schrieffer propusieron en 1957 la siguiente idea, conocida como teoría BCS (por las iniciales de los tres apellidos), originalmente dirigida a explicar la superconductividad. Los electrones, que habitualmente se repelen porque tienen la misma carga negativa, pueden, en determinadas circunstancias, llegar a atraerse levemente. Esta atracción hace que los electrones pasen a formar una suerte de conjunto de parejas ligeramente ligadas, lo que se refleja en el hecho de que el tamaño de esas «extrañas parejas», llamadas *pares de Cooper*, sea inmenso comparado con las interdistancias típicas entre los electrones. Por ello, en lugar de un mar de Fermi los describimos como un gas de *pares Cooper*. Recordemos que no es lo mismo un conjunto de individuos libres que un conjunto de parejas. En las relaciones sociales la diferencia es abismal, por ejemplo en el comportamiento en una pista de baile. En el caso de individuos sin pareja tendremos en general dinámicas diferentes que si se trata de parejas. Pensemos en una reunión en la que juntamos a un gran grupo de desconocidos entre sí, probablemente al inicio habrá un cierto silencio debido a que no hay aun interacciones entre individuos. A medida que algunos

BARDEEN: DEL TRANSISTOR A LA SUPERCONDUCTIVIDAD

El físico e ingeniero estadounidense John Bardeen es, a día de hoy, la única persona que ha sido galardonada dos veces con el premio Nobel de Física. Aun así, es un gran desconocido para la mayoría de la población, en parte quizás por su personalidad y forma de vida ortodoxas, además de por su poca afición a hablar con los periodistas. Nacido en 1908 en Madison, Wisconsin, acabó, tras pasar tres años trabajando para la petrolera Gulf, haciendo su tesis doctoral supervisado por el físico y matemático húngaro Eugene Wigner en la Universidad de Princeton en 1936. En 1945 pasó a trabajar en los míticos Laboratorios Bell a las órdenes del físico William Shockley, y allí le propusieron buscar formas para mejorar los amplificadores de corriente basados en bombas de vacío.

Rencillas entre colegas y un premio Nobel

Bardeen y su colega Walter Brattain consiguieron, gracias a las teorías que desarrolló Bardeen, crear el primer transistor. Su jefe, Shockley, que apenas había participado en esa invención, se apuntó el tanto, cosa que a la larga acabó deteriorando la relación entre ambos. De todas formas, los tres recibieron el premio Nobel de Física por la invención del transistor en 1956, año en el que Bardeen ya estaba trabajando en la Universidad de Urbana-Champaign de Illinois. Se cuenta la curiosa anécdota de que, cuando el rey Gustavo de Suecia le preguntó a Bardeen por su familia en la ceremonia de entrega del Nobel, Bardeen contestó que tenía dos hijos, pero que no habían venido a la ceremonia porque tenían clases. Bardeen prometió al rey que si volvía a Estocolmo traería la familia. Y no tardó demasiado en cumplir su promesa. En Illinois desarrolló en 1957 junto a su estudiante John R. Schrieffer y Leon Cooper la teoría que explica la superconductividad descubierta en 1911 por Kamerlingh Onnes. La teoría se conoce como BCS siguiendo las siglas de los tres descubridores y les valió el Nobel de 1972.



De izquierda a derecha, John Bardeen, William Shockley y Walter Brattain, al lado de un transistor de su creación en una dependencia de los Laboratorios Bell.

¿POR QUÉ NO SOLIDIFICA EL HELIO A BAJA TEMPERATURA?

La superfluidez y la superconductividad, esa capacidad para fluir sin resistencia de líquidos neutros y cargados, son efectos puramente cuánticos. No existirían si el comportamiento de la materia a las escalas más pequeñas que conocemos no fuera tan distinto a lo que estamos acostumbrados en el día a día.

La incidencia de la incertidumbre cuántica

Otro efecto cuya naturaleza es también completamente cuántica es el responsable de que el helio no solidifique nunca. Se denomina energía de punto cero. La mecánica cuántica nos enseña que no podemos determinar con precisión, por ejemplo, la posición y el momento lineal —el producto de su masa por su velocidad— de un objeto. El límite a la precisión con que podemos conocer ambas debe cumplir la ecuación siguiente: $\Delta_p \Delta_x \geq \hbar/2$ (es decir: el producto de las incertidumbres es, como mínimo, la mitad de la constante normalizada de Planck). Poniendo números para el caso del helio, esto hace que en condiciones de presión normal —*verbi gratia*, una atmósfera— los átomos de helio (en la imagen) tengan una energía mínima que, de hecho, es demasiado grande para conseguir que los átomos se distribuyan regularmente, solidificando al bajar la temperatura hasta el mismísimo cero absoluto. Es decir: la incertidumbre cuántica no deja que los átomos se localicen lo suficiente para pasar de comportarse como un líquido al típico sólido. Para llegar a solidificar, además de bajar hasta temperaturas del orden de 1 K, necesitaremos alcanzar una presión de unas 25 atmósferas.



La imagen representa una nube cuántica de electrones rodeando un átomo de helio.

individuos comienzan a presentarse se van formando grupos, parejas, tríos. En este caso, un marcador de los cambios de fase podría ser el ruido generado en la sala, que pasará de cero a un valor finito en cuanto la primera persona rompa el hielo. Y, luego intentaremos justificarlo: los *pares de Cooper*, al estar formados por dos fermiones, ¡son bosones! Y una buena parte de los bosones, en las condiciones termodinámicas precisas, condensan y se convierten en superfluidos. Está claro que, si lo que fluye son electrones, de carga negativa, tendrá sentido que lo que en He 4 denominamos superfluidez, en los electrones se llame superconductividad (ver ilustración en páginas 70 y 71).

¿POR QUÉ SE ATRAEN LOS ELECTRONES?

Comprender la superconductividad llevó muchísimo tiempo, más de 40 años. Uno de los aspectos que dificultó resolver el enigma descubierto por el profesor Onnes en 1911 fue entender por qué los electrones que son fermiones, de alguna manera se comportaban como si fueran bosones. Una forma sencilla de tener un bosón a partir de dos fermiones es juntarlos. Esta es la razón por la que el He 4 se comporta como un bosón, pues está hecho de varios fermiones que se juntan de una forma determinada para resultar en un comportamiento bosónico de todo el conjunto. En el caso del He 4, sus dos protones y dos neutrones se mantienen unidos gracias a la fuerza nuclear fuerte, que los mantiene ligados a unas interdistancias del orden de los 0,000000000001 metros —es decir, estamos hablando aproximadamente del tamaño típico de los propios neutrones y protones—. Este núcleo se complementa con dos electrones, que están unidos al núcleo gracias a la atracción electromagnética: las cargas de signo opuesto se atraen.

¿Qué puede hacer que los electrones que normalmente conducen la electricidad se emparejen para formar bosones, algunos de los cuales serían susceptibles de formar un condensado de Bose-Einstein? Encontrar el mecanismo no fue fácil. Leon Cooper propuso que los electrones de la superficie del mar de Fer-

mi podrían llegar a atraerse mediante vibraciones propagadas a través de la red de núcleos. La explicación más o menos sencilla sería que un electrón cualquiera atrae a los núcleos positivos que tiene a su alrededor, lo que hace que se le acerquen. Esto distorsiona la red, haciendo que la carga positiva se concentre más en ese sitio, lo que hace que otros electrones se sientan ligeramente atraídos hacia donde ya hay un electrón. Si hacemos cálculos, la energía de ligadura —la energía que cuesta hacer que los dos electrones juntos pasen a ser libres— resulta ser del mismo orden que la energía térmica de los electrones a temperatura ambiente. Esto hace que estos pares de Cooper —pares de electrones ligados por este mecanismo— se formen y rompan continuamente a temperatura ambiente, haciendo que solo a temperaturas ultrafrías consigan hacer pasar el gas de electrones a un gas de pares de Cooper.

A temperaturas ultrafrías, cercanas al cero absoluto, los pares de Cooper se mantienen estables, lo que explica el fenómeno de la superconductividad de Tipo I. Curiosamente, la energía de ligadura entre los electrones es tan pequeña que los electrones que forman el par de Cooper están tremadamente alejados entre sí, cientos de nanómetros, lo que, de hecho, hace que varios de estos pares ocupen la misma región espacial.

Estados cuánticos en el mundo bidimensional

La dimensionalidad y la libertad están íntimamente relacionadas: cuanto mayor es el espacio en que nos movemos, más libres nos sentimos. En el mundo cuántico, una dimensión constreñida impele a la materia a buscar soluciones ingeniosas, generando correlaciones cuánticas imposibles en el mundo clásico.

En el mundo en que vivimos, cada suceso puede describirse con tres coordenadas espaciales y una temporal. En particular, para localizar sin ambigüedades dónde está un objeto en un determinado momento, tenemos que proporcionar tres números para caracterizar su posición y uno más (que hace referencia al tiempo) para determinar el instante preciso en que pasa por dicha posición. Habitamos, pues, un espacio tridimensional. Curiosamente, aunque el espacio tiene tres dimensiones por las que podemos transitar, los animales terrestres vivimos casi toda nuestra vida sobre la superficie del planeta y apenas nos desplazamos a lo largo de la dirección vertical. Así, aunque estemos dentro de un espacio con muchas posibilidades, casi nunca las exploramos del todo, sino que solemos ceñir nuestro movimiento a un mundo prácticamente bidimensional. Esto tiene implicaciones prácticas. Por ejemplo, si queremos viajar de Madrid a Sidney, en lugar de ir por el camino más corto, que consistiría en una recta que atravesara el planeta limpiamente pasando por su núcleo, preferimos tomar uno considerablemente más largo —aunque con mejores vistas— que recorre aproximadamente medio meridiano terrestre. Mientras que un itinerario mide

unos 12 000 km, el otro mide unos 20 000. La diferencia es brutal. Otro ejemplo sencillo lo vemos cuando vamos por una carretera de un solo carril. En este caso tendremos que circular en una sola fila sin poder adelantar al coche de delante. Estaremos constreñidos a movernos en una sola dimensión. Si queremos adelantar, necesitaremos una cierta libertad para movernos en la dirección perpendicular al movimiento, pasando de una dimensión a dos. Como vemos, el número de dimensiones que posee un sistema no es algo baladí, ya que puede alterar mucho la dinámica de las partículas que se mueven por él. Esto, a su vez, puede provocar que las características de dicho sistema sean unas u otras muy diferentes. Las dimensiones tienen consecuencias importantes.

Como veremos a continuación, en el mundo bidimensional aparecen efectos novedosos y diferentes de los que encontramos en el mundo tridimensional. En particular encontraremos sistemas físicos que, cuando forcemos sus condiciones, presentarán fases cuánticas muy distintas de las que posee la materia habitual tridimensional. De hecho, pasaremos de estados de la materia bien conocidos, como son las placas de metal conductoras de la electricidad, a estados más extraños con una gran correlación cuántica. Para comenzar repasaremos el concepto de transición de fase para después entrar de lleno en los efectos cuánticos que aparecen en placas conductoras sometidas a campos magnéticos intensos.

TRANSICIONES DE FASE «NORMALES»

Uno de los fenómenos más sorprendentes que podemos observar sin salir de casa y observando la naturaleza (ver imagen superior de la página 87) es cómo el agua se solidifica, licúa o sublima, transformándose en hielo, líquido o vapor según el caso. A nuestra disposición tenemos, en primer lugar, el hielo que, siendo sólido y poco denso, puede flotar en el agua líquida. El hielo no es capaz de fluir, no puede encontrar, como el agua líquida, la zona de mayor pendiente para bajar; tampoco empapa

los tejidos ni podemos beberlo. En segundo lugar disponemos de agua líquida, la cual tiene unas propiedades completamente diferentes: fluye y desciende montañas, impregna los tejidos y nos permite saciar la sed. Por último tenemos el inaprensible vapor de agua que observamos al hervir H_2O en un cazo, tras lo cual desaparece en el aire, dejando tras de sí apenas algún rastro sutil en forma de humedad en el techo de la cocina o en los cristales de cualquier objeto próximo. Estos tres estados del agua que tan bien conocemos son completamente diferentes entre sí y, aun así, hoy día es bien sabido que no son más que la misma sustancia expresada en tres manifestaciones, digamos estructurales, muy distintas. Si deseamos pasar de uno a otro debemos modificar una de las dos variables que determinan el estado de la materia. Una de ellas es la presión, una magnitud que mide con cuánta fuerza estamos comprimiendo una sustancia. Normalmente realizamos los experimentos al aire libre, de modo que la presión es la que ejerce el propio peso de la atmósfera y es aproximadamente constante cuando nos movemos a lo largo y ancho de la superficie terrestre, a la altura del nivel del mar. La otra variable, de la que ya hemos hablado, es la temperatura, un concepto macroscópico —solo puede definirse si tenemos una cantidad ingente de átomos o moléculas, pero no si tenemos un puñado— que nos ha acompañado desde el principio de los tiempos. Tras múltiples teorías, hoy día se entiende la temperatura como un promedio de la energía cinética de los átomos o moléculas que componen el sistema. En el caso más sencillo de los gases, al aumentar su temperatura se provoca que los átomos que los componen se muevan más rápido. Si el incremento persiste no aparece ningún estado nuevo, a no ser que consigamos tanta temperatura que lo ionicemos, arrancando algunos electrones de cada átomo o molécula. Si llegamos a este extremo habremos cambiado bruscamente las propiedades del gas, que habrá pasado de tener partículas neutras que apenas interaccionan entre sí a un conjunto enorme de cationes positivos y electrones que interactúan poderosamente mediante fuerzas electromagnéticas. Es decir, tendremos un plasma... Un estado que en realidad conocemos tan bien como los tres clásicos.

cos, solo que quizá no hayamos reparado antes en él. La llama de un mechero es un plasma. El corazón ardiente del Sol es un plasma. El gas incandescente que producen las luces de neón más solares es también un plasma, así como la bella luz de una aurora polar (ver imagen inferior en página contigua). Aunque este estado es, de por sí, bastante interesante, su estudio se aleja de las pretensiones de este libro, por lo que nos ceñiremos a sistemas de temperatura relativamente baja, de tal modo que no se lleguen nunca a ionizar las moléculas componentes, para mantener así las propiedades químicas de las mismas. En resumen: consideraremos siempre que tenemos los estados líquido, sólido y gaseoso, que no hemos roto las moléculas de H_2O y que, en esencia, estamos jugando con los mismos ladrillos, las moléculas de agua, para construir las tres fases diferenciadas.

Es importante precisar que lo que hemos contado respecto al agua es un comportamiento común a prácticamente todas las sustancias. Lo único que cambia de una a otra es en qué condiciones de presión y temperatura se pasa de un estado a otro. El alcohol que usamos para desinfectar las heridas, por ejemplo, hiere a $32^\circ C$, que es aproximadamente la temperatura de la piel humana. Por eso, cuando nos rociamos con él se evapora casi al instante. De hecho, esa sensación de frescor que notamos se debe precisamente a que estamos gastando inadvertidamente nuestro exceso de calor corporal en producir el cambio de estado. Otro buen ejemplo de cambio de fase relativamente corriente sería el del estaño que se usa para hacer soldaduras. Este metal se compra en estado sólido, en forma de alambre enrollado. Cuando aumentamos su temperatura resulta fácil lograr que se licue, basta llegar a unos $232^\circ C$, algo que podemos conseguir con una simple llama de mechero. Una vez en fase líquida, el estaño se extiende y, tras retirar la fuente de calor, vuelve a solidificarse, sirviendo de adhesivo conductor para los componentes electrónicos metálicos. Como vemos, en ambos ejemplos las sustancias cambian de estado al modificar su temperatura.

Para expresar el papel de la temperatura en procesos como los dos anteriores decimos que la temperatura es el *parámetro de control* con el que podemos recorrer las diversas fases.



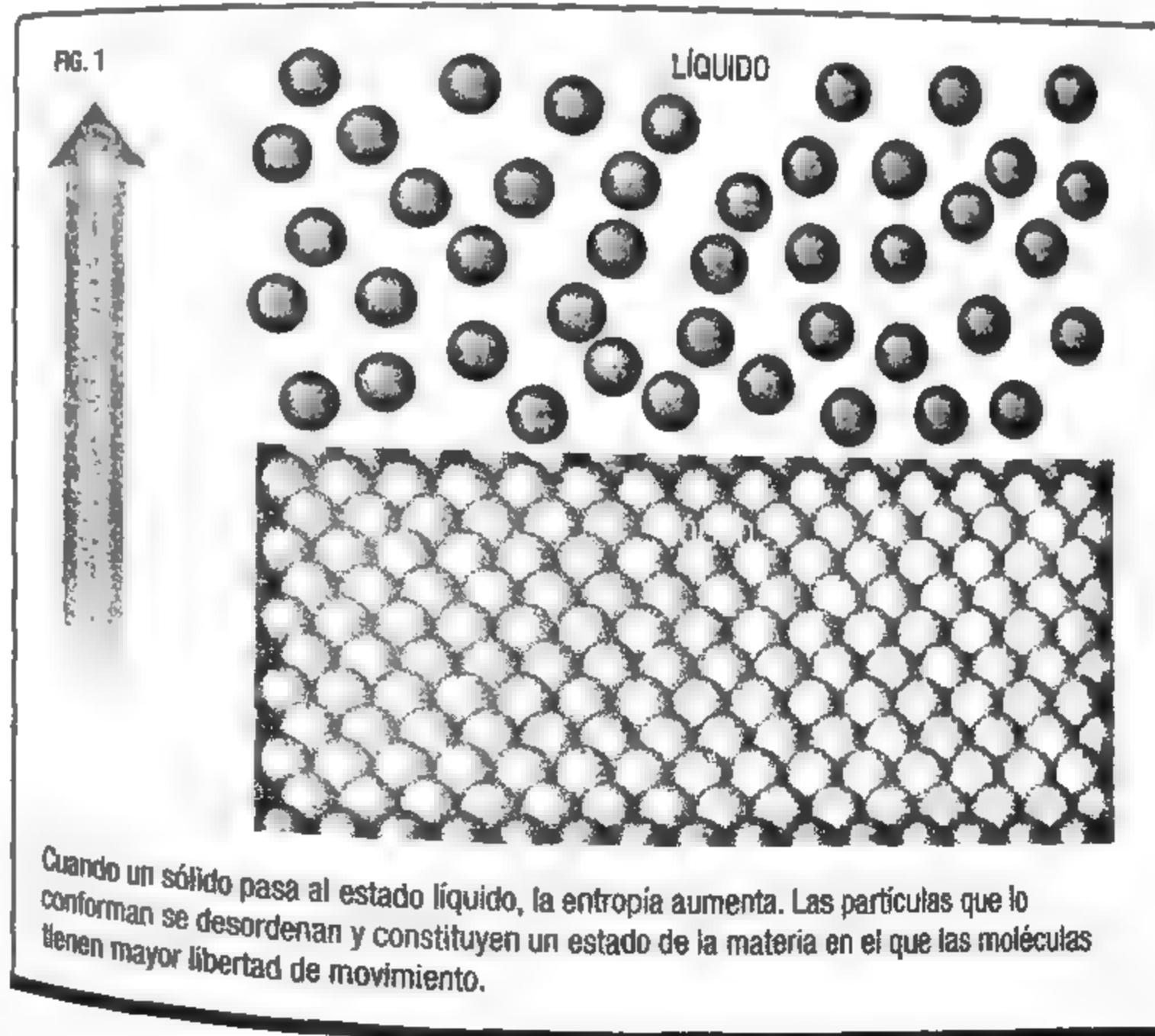
Arriba, los cambios de estado de la materia del agua son algo común en la naturaleza, presente en los paisajes en formato sólido, líquido o en forma de vapor de agua. Abajo, las auroras polares están compuestas por gases ionizados en forma de plasma.

Recordemos que la temperatura mide el promedio de la energía cinética de los componentes microscópicos. Decir esto implica asumir, en cierto modo, que no todas las partículas del sistema tienen la misma energía, por lo que, aparte del valor medio, deberemos tener en cuenta una cierta desviación típica. En un gas la distribución de energía es tal que esta desviación típica queda perfectamente determinada por el propio valor de la temperatura. Por ejemplo, respecto a un gas de moléculas de nitrógeno a 300 K, la velocidad promedio de las moléculas será de unos 500 m/s. Mientras, la desviación típica, que nos da una idea de la amplitud del rango de valores que toman las velocidades, será de unos 200 m/s. Sin embargo, si nuestro gas está a tan solo 75 K, entonces la velocidad promedio de sus moléculas será de 250 m/s y la desviación típica de dichas velocidades será de 100 m/s. En el primer caso la mayoría de moléculas se moverían a velocidades de entre 300 y 700 m/s. En el segundo, gran parte de las velocidades estarían comprendidas entre los 150 y los 350 m/s. Como vemos, la fluctuación en la velocidad decrece a medida que disminuimos la temperatura (y, por tanto, también la propia velocidad). Entonces, aun cuando un cierto estado tenga una temperatura bien definida, muchas de sus partículas tendrán energías bastante alejadas del promedio. De hecho, podemos pensar que lo que dispara el cambio de un estado a otro es precisamente la existencia de estas fluctuaciones térmicas. Pongamos por ejemplo el hielo, cuyas moléculas de agua están ordenadas y solo pueden vibrar o rotar alrededor de sus posiciones de equilibrio. La fluctuación térmica de la posición de esas moléculas es muy pequeña, en particular mucho menor que la distancia entre ellas. A medida que aumentamos la temperatura, la fluctuación térmica de las posiciones aumenta y puede llegar a igualar dicha distancia intermolecular. Esto significa que muchas moléculas se saldrán tanto de sus posiciones de equilibrio que estas dejarán de tener sentido. Es en este momento cuando el sistema se desordenará y pasará de ser un sólido a un líquido. En el líquido se mantiene una gran correlación entre las moléculas pero mucha menos que en el caso del sólido. El mismo modo de razonar se puede emplear para comprender

la transición de líquido a gas. En un líquido las moléculas se mantienen cercanas gracias a una interacción débil y de corto alcance llamada *fuerza de van der Waals* (llamada así por el físico que las describió, el neerlandés Johannes D. van der Waals). Al aumentar la temperatura, las fluctuaciones térmicas alejan lo suficiente a las moléculas, de modo que estas dejan de sentir estas fuerzas y pasan a volar prácticamente libres en el espacio. Es decir, al liberarse de la interacción que las mantenía unidas las moléculas pasan al estado gaseoso.

¿ENERGÍA U ORDEN? ¡ENTROPIA!

La teoría que formalizó las transiciones de fase fue la termodinámica, que es la rama de la física que estudia la transferencia de energía que se produce entre las moléculas, introduciendo un nuevo y potente concepto denominado *entropía* (figura 1).



Esta magnitud aparece de pronto y se vuelve automáticamente fundamental en la física, situándose a la misma altura de otro concepto tan imponente y a la vez tan mundano como la energía. Aclaremos un poco en qué consiste cada una de ellas. Para empezar, la energía cuantifica nuestra capacidad de realizar un trabajo. Por ejemplo, la energía de una batería nos da una medida de cuántas vueltas podrá dar un motor conectado a ella. La entropía, por el contrario, cuantifica el grado de desorden de un sistema. A mayor entropía, mayor desorden. Como queda claro, son dos magnitudes completamente distintas pero que, curiosamente, juegan un papel determinante en cómo se comportan los sistemas en los cambios de fase o en las reacciones químicas. Volvamos a nuestro día a día para intentar descubrir cómo funcionan. Supongamos que tenemos un gas confinado en un recipiente. Este gas está formado por un montón de átomos o moléculas en movimiento que chocan sin cesar, entre sí y con las paredes del recipiente. En una aproximación *grueso modo* podemos suponer que los choques son todos elásticos, lo que hace que los átomos o moléculas no pierdan energía al colisionar. Se trata de un sistema bastante desordenado de pequeños componentes moviéndose por doquier dentro del recipiente. Pero... ¿qué ocurre si abrimos el recipiente dentro de una habitación? Lo que se ha observado desde hace siglos es que el gas contenido en el recipiente escapa del mismo y se esparce por la habitación, siendo extraordinariamente improbable —seamos prudentes— que observemos que los átomos o moléculas vuelvan a introducirse en el recipiente pasado un tiempo. El sistema ha pasado a un estado mucho más desordenado de manera natural, aumentando su entropía aun manteniendo su energía constante. Lo que estamos viendo con este ejemplo es que los sistemas físicos tienen una tendencia *natural* a aumentar su desorden y, por tanto, su entropía. Con la energía, por contra, no ocurre lo mismo. Cuando colgamos una cuerda entre dos postes, la curva que se forma no representa un aumento de su energía potencial, sino justo lo contrario. En general, cuando dejamos evolucionar un sistema, este tiende a asumir su configuración de mínima energía.

Pero ¿qué ocurre entonces en los sistemas físicos? Acabamos de decir que la entropía tiende a aumentar y la energía, a disminuir. Aunque es posible que, en muchas ocasiones, ambas magnitudes vayan de la mano, en general podemos esperar que energía y entropía aumenten o disminuyan a la vez, de modo que alguna de las dos magnitudes no se comporte de modo enteramente satisfactorio. Así que, ¿cómo podemos aunar lo que sabemos de entropía y energía en un marco lógico que sea irreprochable? Pues bien, esto se realiza introduciendo una nueva magnitud, denominada *energía libre de Helmholtz* (planteada por el médico y físico alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894)) y notada con la letra *F*, o sencillamente como *energía libre*, que relaciona la energía, la temperatura y la entropía mediante la siguiente expresión:

$$F = E - TS$$

Donde *E* es la energía, ya sea potencial gravitatoria, cinética, electromagnética, etc.; la *T* es la temperatura medida en kelvin y *S* es la entropía. Gracias a esta nueva variable vamos a solucionar el nudo gordiano que teníamos entre manos. Lo que nos dice la termodinámica es que a los sistemas les gusta estar en el valor más pequeño posible de la energía libre. Veamos con detalle la expresión matemática anterior. Si la energía y la temperatura son constantes, entonces lo que buscará cualquier sistema será el estado de entropía más grande, el más desordenado, de modo que el valor de la energía libre sea el menor posible. Esto mismo ocurrirá en sistemas en los que, aunque la energía no sea constante, la temperatura sea suficientemente alta. Imaginemos que estamos a miles o millones de kelvin. En general, en ese límite el valor de la energía no sería relevante y la energía libre dependería casi totalmente del producto de la temperatura y la entropía. Por contra, si tenemos un sistema donde la temperatura es suficientemente baja, entonces la importancia de la entropía será mínima (ya que su valor se multiplicará por un número pequeño). En el caso extremo del cero absoluto, la energía libre de von Helmholtz

coincidirá con la energía, de modo que la entropía no jugará ningún papel. En resumen: a temperaturas suficientemente bajas la energía es más importante que la entropía.

Si volvemos de nuevo nuestra mirada a las transiciones de fase entre agua líquida, sólida y gaseosa, vemos que podemos explicarlas de forma clara. La entropía, para empezar, es mayor en el gas

—donde cada átomo o molécula hace lo que le da la gana— que en el líquido, donde hay cierta correlación entre las moléculas cercanas. A su vez, la entropía del líquido será mayor que en el sólido, en el que el orden es estricto y la disciplina, férrea. Con la

energía ocurre algo semejante. En el gas la energía cinética de las partículas es mayor que en el líquido, ya que en este estado las moléculas apenas disponen de espacio para moverse. Del mismo modo, las partículas de un líquido se moverán más rápidamente que las de un sólido, ya que en este los átomos están prácticamente en reposo en sus posiciones. ¿Qué determina entonces en qué estado se encuentra el agua? Pues bien, a altas temperaturas domina el efecto de la entropía, por lo que el estado más estable será el que tenga mayor desorden, el gaseoso. A baja temperatura, sin embargo, ya hemos dicho que domina la naturaleza energética, por lo que el estado más estable será el que presente menor energía. Es decir, el sólido. El estado líquido, por tanto, solo puede aparecer en un estado de temperaturas intermedias. Como vemos, el papel que juega la temperatura es crucial, ya que decide hacia qué lado se inclina la balanza entre tener la mínima energía o la máxima entropía posibles y, como consecuencia, qué estado es el más estable a la temperatura dada.

TRANSICIONES DE FASE CUÁNTICAS

En las transiciones de fase habituales la temperatura es el parámetro que permite entender el paso entre unas fases y otras,

El calor también puede ser producido por la fricción de los líquidos, en los que no habría cambios estructurales ni liberación de calor latente.

HERMANN VON HELMHOLTZ

controlando el balance entre energía y entropía. Sin embargo, desde hace un par de décadas se ha reconocido la existencia de otro tipo de transiciones de fase de naturaleza completamente distinta. Son las denominadas *transiciones de fase cuánticas*. Este tipo de transiciones tienen una propiedad fundamental: ocurren a temperatura cero en la escala Kelvin. Esto es lo mismo que decir que se producen cambios de estructura en los que la temperatura no juega ningún papel. Pero ¿qué cambios pueden tener lugar a cero kelvin? La respuesta es curiosa: lo que cambia son las propiedades cuánticas de la materia! El parámetro o magnitud que permitirá controlar el paso entre unas fases cuánticas y otras dependerá del sistema que tengamos entre manos, pero no será, en ningún caso, la temperatura, ya que estamos considerando que esta es estrictamente cero. De hecho, para ser precisos, los sistemas estarán a temperaturas tan bajas que la energía térmica será mucho más pequeña que la energía de punto cero cuántica. Esta última, está íntimamente relacionada con el principio de incertidumbre de Heisenberg, según el cual no se puede medir de forma simultánea la posición y momento lineal de una partícula.

Veamos un ejemplo desde un punto de vista ligeramente diferente. Consideremos un conjunto de átomos de carácter bosónico, cada uno de ellos atrapado en una pequeña trampa en una región del espacio, lo que suele denominarse «gas ultrafrío confinado en una red óptica». Pensemos que, inicialmente, tenemos las trampas rodeadas con barreras muy altas, lo que hace que un átomo en una trampita no pueda pasar a la trampa de al lado. De hecho, las barreras son tan altas y anchas que los átomos no pueden pasar ni mediante el efecto túnel cuántico. En esta situación, estando a la temperatura más baja posible ¿obtendremos un condensado de Bose-Einstein? Contamos con bosones y con temperaturas muy bajas, y sabemos que a los bosones les gusta condensar y proceder a comportarse todos de la misma forma, por lo que parece claro que debería formarse un condensado. Aun así, no se forma. La razón es que si las barreras son tan altas, los bosones no pueden siquiera notar que están cerca de otros

bosones y, de hecho, da un poco igual que sean bosones o fermiones. Recordemos que el carácter bosónico o fermiónico solo se pone de manifiesto cuando tenemos muchos de ellos juntos. En un nivel de descripción algo más elaborado, lo que ocurre es que la función de onda de cada bosón, que da una medida de las propiedades cuánticas del mismo, está confinada en su trampa y no tiene ningún solapamiento con la función de onda del de al lado. En este estado —un bosón en cada trampita— tenemos lo que se denomina un *aislante de Mott* (por el físico británico y premio Nobel Nevill Francis Mott (1905-1996)). Lo de aislante es porque no hay ningún tipo de transporte, los átomos están fijos en sus «jaulas».

¿Cómo podemos hacer que cambie la situación? Una opción razonable es modificar las alturas de las barreras entre las trampas. Este parámetro, la altura de barrera, nos permitirá transitar entre dos estados muy diferentes. Si esta disminuye llegará un momento en que los átomos bosónicos tendrán una cierta probabilidad de atravesarlas. En el lenguaje de la cuántica: su tamaño cuántico será mayor que la trampa que lo acoge y comenzará a haber un solapamiento entre los «tamaños» (las funciones de onda) de los diferentes bosones. Si hay un solapamiento, los bosones empiezan a notar que no están solos y, ahora sí, formarán un condensado de Bose-Einstein completamente deslocalizado en la red de trampas. Al variar una magnitud como es esa barrera entre trampas, cambiará completamente el comportamiento del sistema, pasando de un estado aislante, sin ningún transporte, a un estado superfluido. Más importante aún: habremos provocado una transición de fase únicamente alterando un parámetro, bajo nuestro completo control.

Campos magnéticos moviendo electrones: el efecto Hall

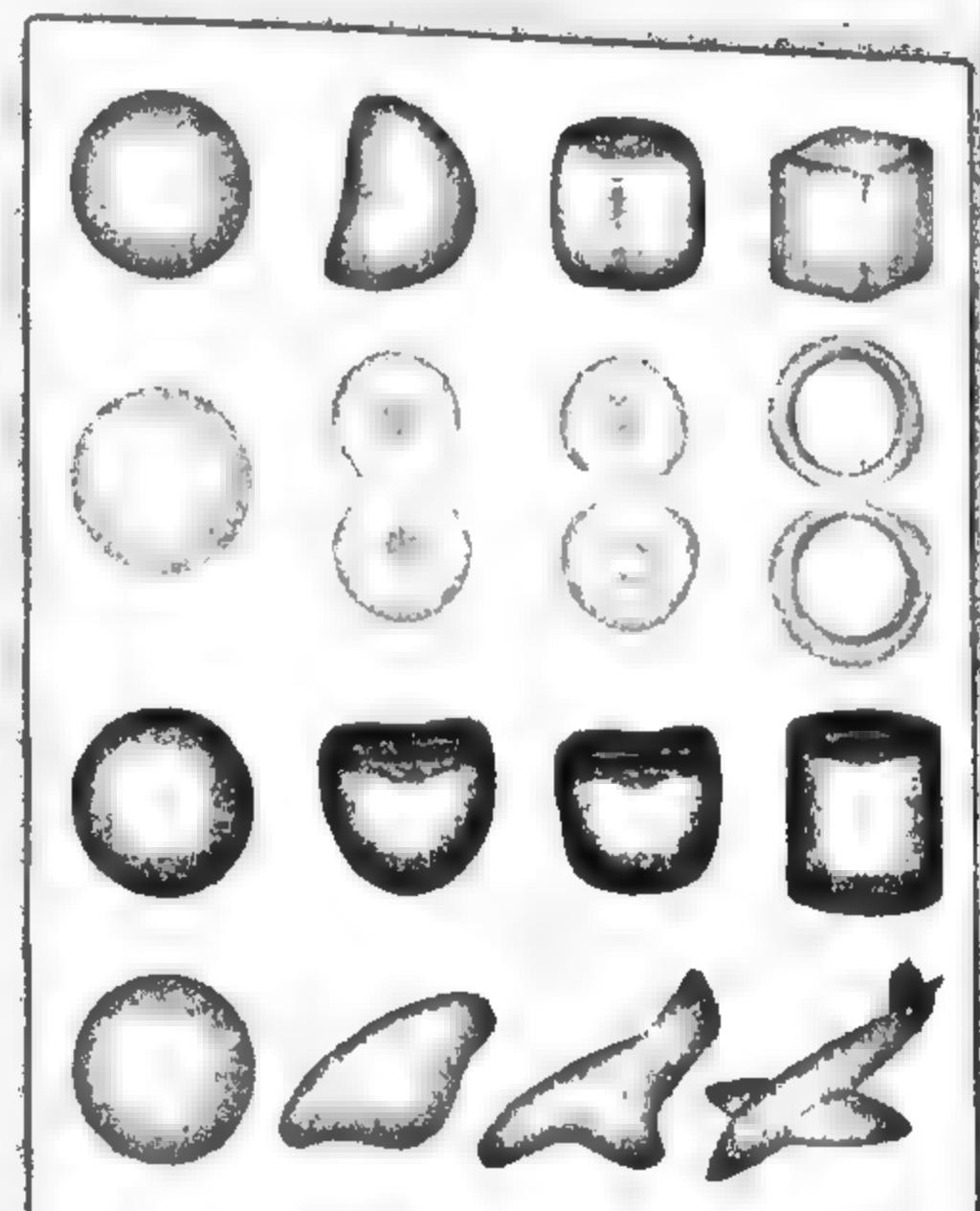
Las transiciones de fase cuánticas no han sido muy exploradas hasta la fecha, aunque hay ejemplos notables como el que hemos descrito más arriba. Una serie de sistemas que tienen propiedades muy curiosas y en los que tienen lugar transiciones de

LOS ESTADOS TOPOLOGICOS DE LA MATERIA

En el año 2016 la Academia de Ciencias de Suecia otorgó el premio Nobel de Física a David J. Thouless, F. Duncan Haldane y J.M. Kosterlitz por sus «descubrimientos teóricos sobre transiciones de fase topológicas y fases topológicas de la materia». Las propiedades topológicas son aquellas que distinguen, por ejemplo, un donut (cuya forma, matemáticamente, se llama toro o toroide) de una esfera. En este caso, podemos contar que hay «un agujero» en el donut, mientras que en la esfera hay «cero» agujeros. Si deformamos el donut, sin hacer más agujeros, cambiaremos la forma pero no la propiedad topológica que define «un agujero». Para modificar la topología tendremos que añadir agujeros. De forma intuitiva, vemos que las propiedades topológicas son muy robustas frente a los cambios, pues podemos estirar o apretar el objeto sin variar su topología. Esto las hace muy útiles para guardar información de forma segura o, al menos, para lograr que esta no se pierda si se producen cambios pequeños en el objeto.

Topología cuántica

Kosterlitz y Thouless consiguieron describir los estados cuánticos que aparecen en los sistemas bidimensionales, como en el caso del efecto Hall cuántico entero, según el tipo de topología que presentan. Todos los fenómenos tipo Hall son muy robustos, en ellos la cuantización de la conductividad se produce sin depender demasiado de la geometría de la muestra, ni de las impurezas, ni de casi nada. Es el caso del donut: aunque lo deformemos y lo apretemos, este seguirá teniendo un agujero más que una esfera. Haldane hizo algo parecido con sistemas unidimensionales, encontrando la forma en que la topología aparece en cadenas de imanes cuánticos. En ambos casos, las propiedades topológicas aguantan siempre muy bien las pequeñas imperfecciones de la vida cotidiana. Eso sí: saber si un objeto tiene o no agujeros, requiere una visión global.



De las cuatro filas de la figura solo en una de ellas se realizan cambios que afectan la topología de la forma original. Como puede verse, el número de agujeros, o defectos topológicos, se incrementa en dos en la segunda fila, mientras que en las demás la topología no cambia.

fase cuánticas son los sistemas prácticamente bidimensionales. Para abrir boca comenzaremos por un efecto clásico y después veremos qué ocurre cuando entre en juego la cuántica. El fenómeno en cuestión es el *efecto Hall*, descubierto por el físico estadounidense Edwin Hall (1855-1938) cuando era aún un joven estudiante en 1879.

Cojamos una placa metálica rectangular, una pila y algo que produzca un campo magnético, como una bobina, un imán o un alambre conductor. La placa metálica es buena conductora de la electricidad, así que, si ponemos los polos positivo y negativo de la pila en los lados cortos de la placa, generaremos una corriente eléctrica entre ambos puntos. A escala microscópica tendremos una suerte de río de electrones fluyendo de un punto al otro del metal. En cambio, no habrá ninguna corriente transversal a la corriente inducida por la pila, es decir, entre los extremos largos de la placa. Los electrones no se mueven transversalmente, no tienen ningún motivo para ello, y por tanto no hay corriente transversal alguna.

El asunto cambia si añadimos un campo magnético perpendicular a la superficie de la placa. Esto es un campo que intentaría alinear las brújulas perpendicularmente a la placa. El campo magnético tiene un efecto bien conocido sobre las trayectorias de las partículas en movimiento: las curva. Este efecto se ha utilizado en aplicaciones tan pintorescas como son los haces de electrones existentes en los antiguos televisores con tubo. En ellos, un haz de electrones era dirigido mediante campos magnéticos hacia el punto de la pantalla que convenía para ir formando la imagen. Si en ausencia de un campo perpendicular teníamos una corriente eléctrica longitudinal, al añadir el campo perpendicular los electrones deflectados (desviados de la dirección de una corriente) se irán acumulando en un lado de la placa, provocando una diferencia de potencial entre ambos lados y generando una corriente eléctrica transversal a la original. Esta corriente que aparece al someter a nuestra plaquita original a un campo perpendicular se conoce como *corriente Hall*.

El voltaje que se puede conseguir en la dirección transversal es proporcional a la corriente longitudinal y al campo magnético.

Variando una u otra podemos aumentar o disminuir el voltaje de forma continua debido al efecto Hall, como hacemos con casi todo en nuestro día a día. Pero, como es costumbre en la historia reciente de la física, las cosas no resultan tan sencillas cuando entran en juego las escalas muy pequeñas. Es en ese momento cuando la mecánica cuántica comenzará a trastocar nuestro entendimiento «clásico».

La influencia de la mecánica cuántica sobre el efecto Hall

¿Qué ocurre si forzamos a tope nuestro experimento y sometemos la placa a campos magnéticos tremadamente grandes y a temperaturas muy bajas? Cuando descubrió el efecto que lleva su nombre, Edwin Hall experimentaba a temperatura ambiente con una fina lámina de oro y con campos magnéticos inferiores a 1 tesla (la unidad de densidad de flujo magnético del Sistema Internacional de Unidades). Para hacernos una idea de lo que eso representa, cabe recordar que el campo magnético terrestre que mueve la aguja de las brújulas es de unos 30 microteslas. Un tesla y medio es el campo magnético que usan las resonancias magnéticas nucleares más sencillas. Cuando hablamos de pasar de campos normalitos a muy grandes nos referimos a campos de unos 15 teslas, que, curiosamente, solo pueden conseguirse en campos producidos por imanes superconductores. Además, es necesario bajar la temperatura a pocos grados por encima del cero absoluto. Estas eran las condiciones en las que trabajaba el físico alemán Klaus von Klitzing (n. 1943) en 1980 en el laboratorio Hochfelt Magnet-Labor en Grenoble, Francia, y que le llevaron a descubrir el denominado *efecto Hall cuántico entero*.

Von Klitzing descubrió un efecto en principio inesperado. La resistencia —el cociente entre el voltaje y la corriente— que ofrecía el material a la corriente Hall no era una función continua del campo magnético perpendicular aplicado, sino que presentaba unos escalones. Cabe recalcar aquí que la resistencia tiene un valor y, si aumentamos el campo, la resistencia se

ROBERT L. LAUGHLIN Y SU FUNCIÓN DE ONDA

En mecánica cuántica el estado de las partículas viene descrito por un objeto matemático denominado **función de onda**. La función de onda de un grupo de electrones es un objeto que depende de las coordenadas de cada uno de ellos. Para explicar el efecto Hall cuántico fraccionario, el Nobel de Física Robert Laughlin (en la imagen) introdujo una función de onda que se puede escribir del siguiente modo,

$$\Psi(z_1, z_2, \dots, z_N) \propto \prod_{i < j} (z_i - z_j)^3$$

donde $z_k = x_k + iy_k$ es una variable que sitúa la posición del electrón k -ésimo. Recordemos que estamos en dos dimensiones, por lo que basta proporcionar la coordenada x e y de cada electrón. En esta fórmula i es el número imaginario, solución de la ecuación $i^2 = -1$. En la interpretación habitual de la mecánica cuántica, el módulo al cuadrado de la función de onda nos da la densidad de probabilidad de encontrar a los electrones en las posiciones correspondientes. Si nos fijamos bien, en la función de onda de Laughlin la probabilidad de encontrar dos electrones en el mismo sitio es cero. Sin embargo, si nos preguntamos cuál es la probabilidad de encontrar un electrón cualquiera en una posición cualquiera, el resultado es una probabilidad prácticamente homogénea en todo el espacio.

Diferencias entre los efectos Hall cuántico entero y fraccionario

Esta función de onda sirvió para explicar el primer caso de efecto Hall cuántico fraccionario, demostrando que entre este último y el efecto Hall cuántico entero hay una diferencia importante. El entero se puede entender a partir de propiedades de un solo fermión, teniendo en cuenta como se comportan los fermiones. En el fraccionario las correlaciones entre fermiones son más complejas. Aparecen comportamientos emergentes, descritos en parte por la función de Laughlin, que no son fáciles de entender a partir de los constituyentes. Los comportamientos emergentes son toda una rama de la ciencia actual que, por ejemplo, se aplican para entender el comportamiento del cerebro humano, lo que requiere comprender las propiedades de conectividad de la red de neuronas, más que saber mucho de una neurona en sí.

Robert Laughlin, el primero por la derecha, aparece en el grupo de laureados con el premio Nobel de 1998, flanqueados por el entonces presidente de Estados Unidos, Bill Clinton.



mantiene constante para varios valores del campo. Pero en un momento determinado llega un campo crítico en el que la resistencia pega un salto y pasa a un nuevo valor, y así sucesivamente. Lo más fascinante del caso es que los valores de la resistencia que se mantenían constantes al aumentar el campo magnético resultaron ser independientes del material, es decir, de la presencia de impurezas e imperfecciones, siendo sencillamente proporcionales a h/e^2 . Este es un resultado potente, en el que h representa la constante de Planck, paradigma de la física cuántica y la e es la carga del electrón. Fue un descubrimiento francamente inesperado en el que el investigador se encontró de cara con un efecto novedoso. Y fue recompensado por ello: cinco años más tarde, von Klitzing recibió el premio Nobel de Física por este descubrimiento.

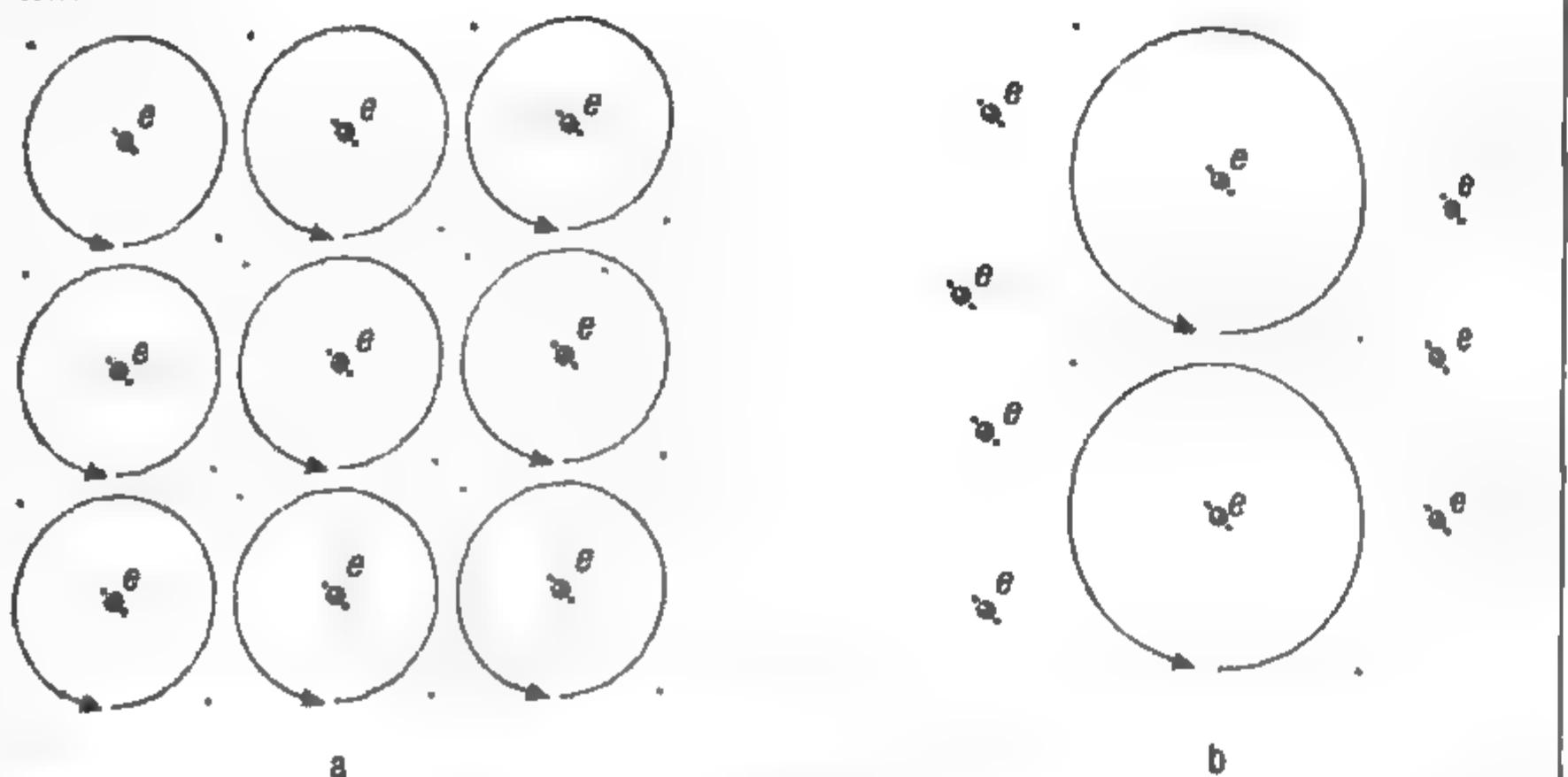
Un detalle importante que vale la pena enfatizar es que las resistencias que encontró Von Klitzing correspondían a determinados números enteros. La cuantización de la resistencia Hall descubierta por Von Klitzing puede entenderse a partir de lo que le ocurre a un solo electrón que se mueva en una placa bidimensional sometida a un campo magnético muy potente. Una vez entendido lo que le sucede a ese electrón, se puede construir la teoría para muchos electrones que casi no interactúen. Esta teoría explica correctamente la existencia de valores estacionarios de la resistencia Hall al aumentar el campo magnético externo.

La idea más o menos es la siguiente. Si aumentamos mucho el campo externo, los electrones se desviarán tanto que llegarán a describir trayectorias cerradas circulares. Para cada campo determinado habrá un conjunto de trayectorias circulares posibles de diferentes radios. Cuanto mayor sea el radio, mayor será la energía que tendrá el electrón en esa trayectoria. El radio de la órbita de menor tamaño es proporcional al valor del campo magnético perpendicular. En la figura 2 vemos cómo, dependiendo del tamaño del campo, en una superficie dada cabrá un número diferente de órbitas circulares de mínima energía, las

En cualquier caso, hay que aceptar las enseñanzas de la naturaleza.

HORST STÖRMER

FIG. 2



Dada una determinada superficie, si el campo magnético perpendicular es muy grande caben más electrones orbitando circularmente (a) que si el campo es más pequeño (b).

cuales, al tener el campo el momento magnético intrínseco de los electrones tan fuerte, el espín, se alinean completamente con el campo externo. Como si se tratara de diminutas brújulas, todos los electrones apuntan en la dirección del campo perpendicular. Ya dijimos que los electrones, al ser fermiones, se van situando de dos en dos en las órbitas. Pero en este caso, al estar alineados con el campo, solo puede ponerse uno en cada trayectoria circular. Ahora viene el tema importante: en la placa, sometida a un determinado valor de campo, cabrá un número determinado de trayectorias circulares. En la figura de la izquierda caben nueve; en la derecha, dos, lo que hará que podamos poner un número determinado de electrones en el estado de mínima energía. Así pues, es como si tuviéramos unos átomos cuya estructura de niveles y orbitales pudiera variarse: al cambiar el campo magnético externo, cada valor en el que todas las órbitas tengan un electrón presentará un estado diferente de conducción.

Curiosamente, para explicar la característica más prominente del resultado de Von Klitzing, esto es, la existencia de

DIAGRAMA DE FASES DE LA MATERIA BARIÓNICA

Como hemos visto, bajo situaciones de temperaturas extremadamente bajas la materia presenta fases superfluidas y superconductoras. Si la temperatura y la presión son muy muy altas, también aparecen fases fascinantes que trastocan la materia ordinaria y la composición de sus átomos. Un ejemplo son las estrellas de neutrones, en las cuales los neutrones y protones chocan con tanta violencia que se pone de manifiesto su propia estructura de quarks y gluones. Esto llevó a los científicos a postular la existencia de un plasma de quarks y gluones. Los cosmólogos creen que en los inicios del universo, una diezmillésima de segundo después del Big Bang, la materia debía estar formada por un plasma de quarks y gluones que, poco después, derivó en la formación de los primeros protones y neutrones. En la figura podemos ver las diferentes formas extremas de materia en función de la densidad y la temperatura. La escala de temperaturas está en una unidad típica usada en física nuclear, el MeV, equivalente en este caso a 11,6 millones de kelvin. Observemos cómo nuestro mundo habitual está en un pequeño punto, el «1», donde están los núcleos atómicos normales. Las líneas marcan lo que se espera descubrir en varios aceleradores, como el Gran Colisionador de Hadrones de la Organización Europea para la Investigación Nuclear, el CERN (por las siglas en francés *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*), ubicado cerca de Ginebra, el Colisionador Relativista de Iones Pesados, el RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*), situado en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, en Estados Unidos, y el Centro para la Investigación en Iones y Antiprotones, FAIR (*Facility for Antiproton and Ion Research*), actualmente en construcción en Darmstadt (Alemania).

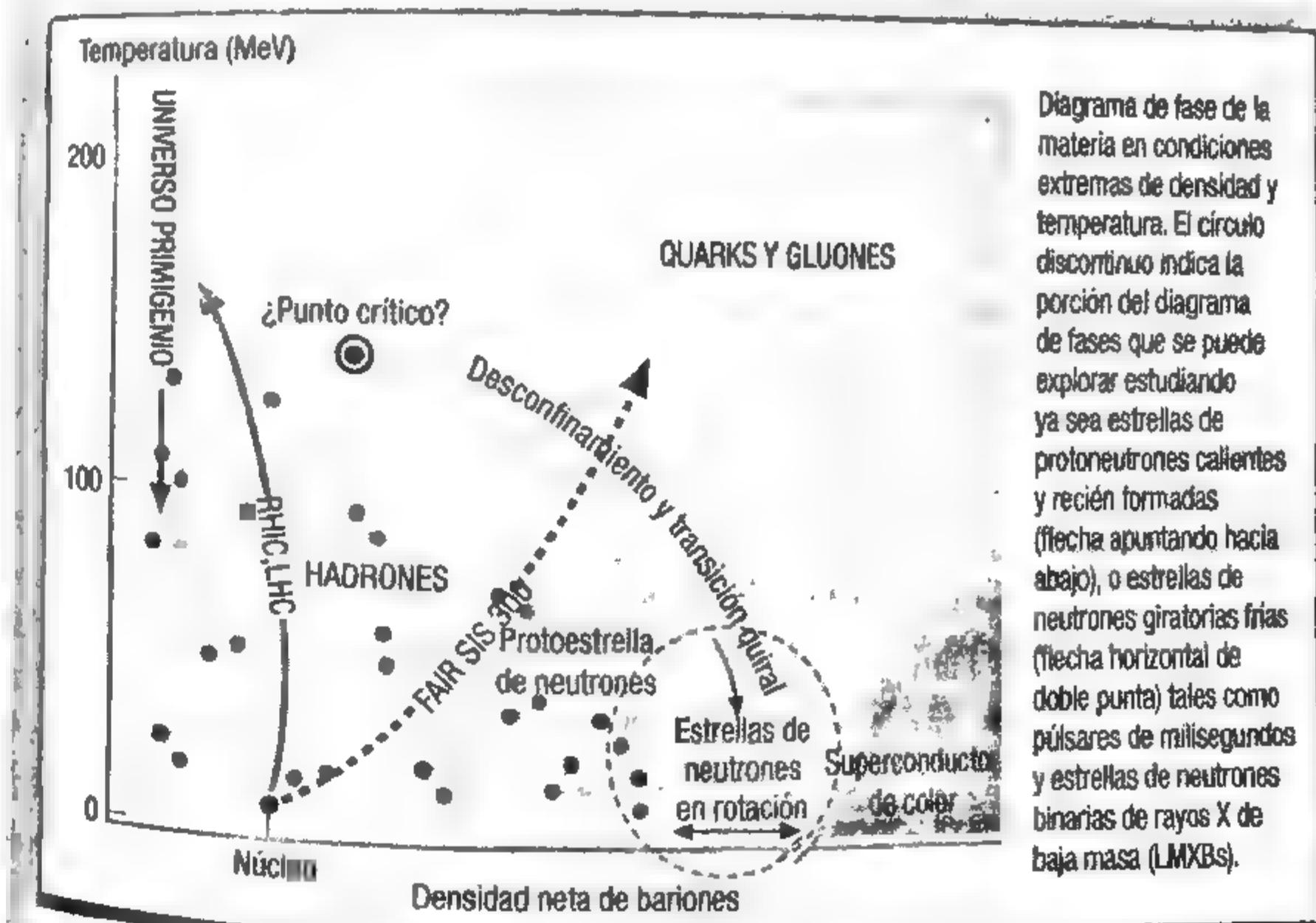
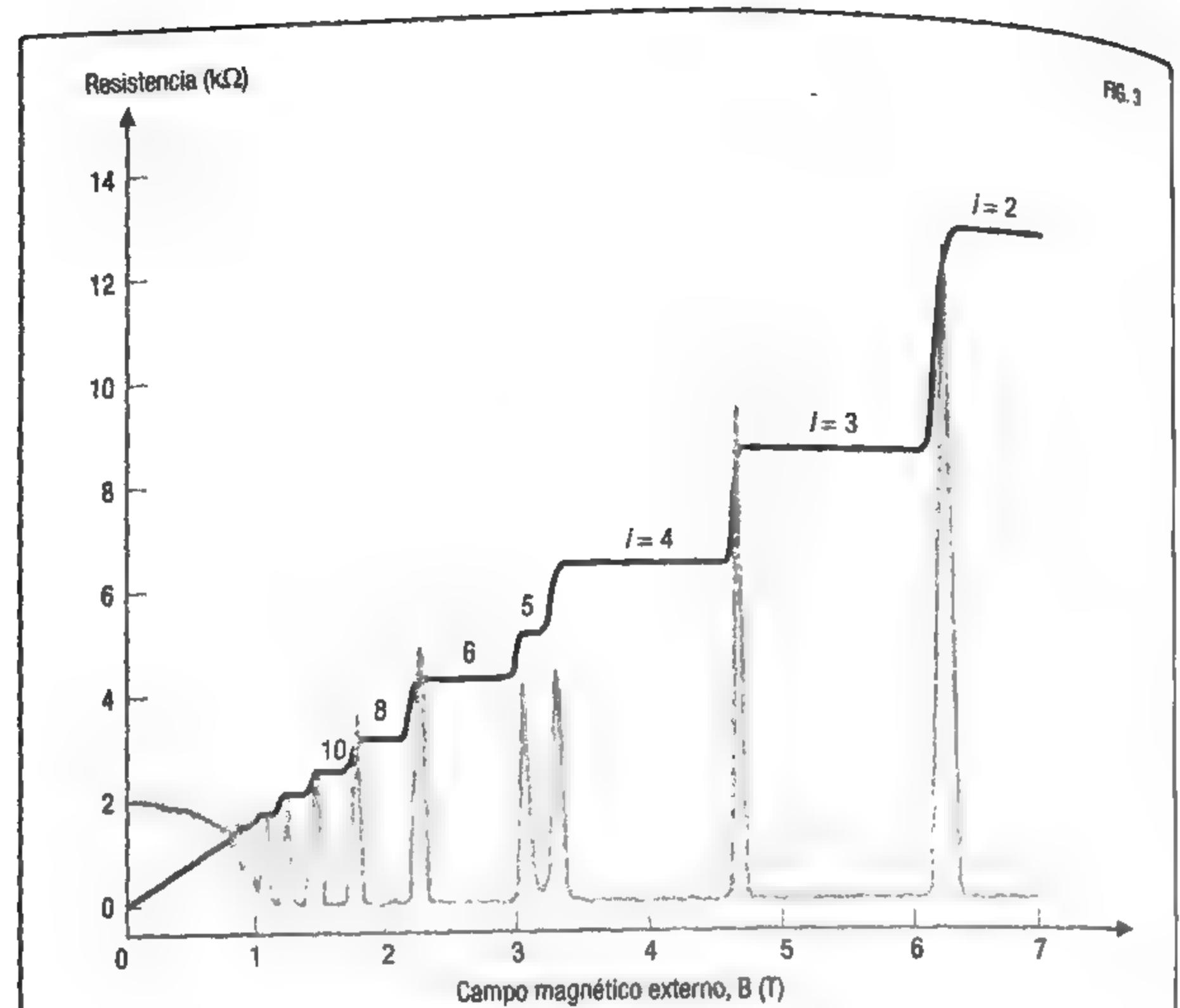


Diagrama de fase de la materia en condiciones extremas de densidad y temperatura. El círculo discontinuo indica la porción del diagrama de fases que se puede explorar estudiando ya sea estrellas de protoneutrones calientes y recién formadas (flecha apuntando hacia abajo), o estrellas de neutrones giratorias frías (flecha horizontal de doble punta) tales como púlsares de milsegundos y estrellas de neutrones binarias de rayos X de baja masa (LMXBs).



La resistencia Hall varía de forma escalonada a medida que aumentamos el campo magnético externo, B . La altura de los escalones viene dada por la constante, h/e^2 dividida por un entero « i ». En la figura se muestran los escalones para $i=2, 3, 4, 5, 6, 8$ y 10 . La curva con picos muestra la resistividad longitudinal y tiene ceros en cada escalón.

escalones (figura 3), es necesario tener en cuenta un factor inesperado: la presencia de impurezas e imperfecciones en la muestra. Esto parece un poco paradójico, ¿cómo puede ser que las impurezas den lugar a un comportamiento completamente independiente de ellas, sean del tipo que sean? La razón no es sencilla. En primer lugar, y en el marco de la mecánica cuántica, las impurezas provocan que algunos estados cuánticos pasen de permitir la conducción a impedirla. Técnicamente, lo que ocurre es que pasan de estar deslocalizados —conec-

tando, por ejemplo, los dos extremos perpendiculares de la placa— a localizarse alrededor de las impurezas. Así pues, al ir cambiando el campo magnético externo, vamos poblando estados deslocalizados hasta ocupar uno localizado. De esta manera, al ir variando el campo magnético modificamos la estructura de niveles que los electrones van llenando. Lo que va unido al hecho de que la mayoría de estos niveles son localizados, por lo que poblarlos o no no afecta a la conductividad, que solo cambia cuando los electrones pueblan un nuevo estado deslocalizado. Esto explica lo que midió Von Klitzing: la resistencia depende claramente del campo y cambia drásticamente a valores enteros de la fracción de llenado.

Efecto Hall cuántico: fracciones

La sorpresa fue mayúscula cuando un par de años después del descubrimiento del efecto Hall cuántico, el físico alemán Horst Störmer y su colega estadounidense Daniel Tsui, de los laboratorios AT&T y Bell, estudiaron el mismo efecto para valores del campo magnético aún mayores, de unos 20 tesla. Además de todos los «enteros» encontrados por Von Klitzing, ellos identificaron algunos valores más que se correspondían a fracciones. El más famoso de ellos fue el valor estacionario de la fracción $1/3$, al que más tarde siguieron otras muchas fracciones. La aparición de valores fraccionarios obligó a repensar cómo se comportan los electrones en estos sistemas, ya que el argumento descrito en la sección anterior no explica estos nuevos estados.

La razón por la que aparecen fracciones no es sencilla. De hecho, como ocurre con la superconductividad y la superfluidez, se debe a la aparición de un comportamiento colectivo que ayuda a los componentes individuales a sobreponerse a la interacción. Dicho en palabras algo más llanas, los electrones, que al tener carga negativa se repelen entre sí, al ser colocados juntos en una caja, se mantienen a una distancia que les permite repelerse un mínimo. Si, por el contrario, se encuentran en la placa bidimensional y sometidos a un campo magnético perpen-

Superfluidez y superconductividad en el universo

dicular, tal y como descubrió el físico teórico estadounidense Robert Laughlin (n. 1950), los electrones no tienen otra opción que organizarse y construir un estado cuántico con correlaciones cuánticas que impidan o minimicen la interacción. El denominado *estado de Laughlin* explica perfectamente la aparición de la fracción 1/3, y, por ello, el físico ganó el Premio Nobel en 1998 junto a Horst Störmer y Daniel Tsui por el «descubrimiento de una nueva forma de fluido cuántico con excitaciones fraccionarias cargadas». El fluido cuántico que descubrieron, y que Laughlin supo describir, tiene unas propiedades curiosas. La primera es que es muy homogéneo, más o menos como una capa de agua. La segunda es que es incompresible: si pretendemos hacer un agujero en el líquido no nos resultará fácil. Por contra, si conseguimos hacerlo, es probable que el agujero aguante durante un buen rato. La tercera, y más sorprendente, es que pese a ser homogéneo la probabilidad de encontrar dos electrones en la misma región del espacio es prácticamente nula.

Como hemos visto, un sistema relativamente sencillo como es una placa conductora cambia completamente sus propiedades dependiendo del valor del campo magnético perpendicular que le apliquemos. Estos cambios ocurren también a la temperatura más baja posible, y la transición entre uno y otro estado cuántico de los electrones no tiene nada que ver con cambios de temperatura. Así pues, estamos en un caso de transición de fase cuántica, donde al variar un parámetro externo cambia la naturaleza de las propiedades cuánticas de los electrones.

La superfluidez y la superconductividad jugarán un papel importante en nuestras vidas. Sepámos qué se cuece en los dos frentes de investigación existentes y viajemos hasta los confines del universo, donde avistaremos un lugar en el que se estima que hay mares superfluidos de neutrones.

Los fenómenos de superfluidez y superconductividad que hemos ido describiendo no forman parte de nuestra experiencia cotidiana. En el caso de la superconductividad, inicialmente fue necesario bajar a temperaturas de casi el cero absoluto para descubrirla, aunque, como sabemos, más tarde fueron encontrándose compuestos superconductores de alta temperatura. En el caso de la superfluidez, el requisito de una temperatura muy baja es inamovible, lo que hace que encontrar sistemas que sean superconductores o superfluidos en la naturaleza sea complejo. Para saber más de ellos, recurriremos a tres ejemplos en los que la superconductividad y la superfluidez están a la orden del día. Los dos primeros son las tecnologías superconductoras concebidas para crear por un lado los ordenadores cuánticos y por otro los laboratorios de gases ultrafríos. El tercero lo tendremos que buscar en el firmamento, pues son las estrellas de neutrones, objetos extraordinarios en los que las condiciones parecen favorables para la aparición de superfluidez mediante un mecanismo de apareamiento similar al utilizado para describir la superfluidez del He 3.

OBJETIVO: EL ORDENADOR CUÁNTICO

Los materiales superconductores (figura 1) se están posicionando en los últimos años como el mejor soporte para conseguir uno de los desafíos mayores que ha acometido la ciencia: el desarrollo del ordenador cuántico. Todos estamos más o menos familiarizados con el ordenador, aunque en algunos casos se nos aparezca bajo la apariencia de un teléfono móvil, pero no todo el mundo sabe qué es exactamente un ordenador cuántico. Para entenderlo tendremos que recordar dos o tres conceptos básicos acerca de cómo trabaja un ordenador

normal. Como sabemos, estos tienen una parte física denominada *hardware*, compuesta por un procesador, circuitos, etc., y una parte que son los programas, denominados *software*. Lo interesante de los ordenadores es que pueden cambiar su funcionalidad dependiendo del *software*: dependiendo de cómo los programemos, tanto podremos entretenernos con infinidad de videojuegos como posibilitarán que mantengamos bajo control la maquinaria de toda una fábrica. Para ello la información se codifica de una u otra forma en los denominados bits, que pueden tomar el valor 0 o 1. El ordenador habitual trabaja continuamente en base a un sistema binario: para él todo son ceros y unos, y lo que hace es transformar, según se le pida, una entrada de ceros y unos en una o varias salidas de ceros y unos. Aun siendo así, ni los informáticos ni los usuarios se comunican con la máquina en código binario, sino que utilizan lenguajes de alto nivel, más parecidos a los que usamos para hablar entre humanos, que luego son traducidos a código binario.

Los bits tienen, pues, solo dos valores, 0 y 1, que pueden representarse físicamente de muchas formas, la más sencilla de las cuales consiste en tener un interruptor abierto o cerrado. Para tratar la información necesitamos registros que guarden estos ceros y unos y mecanismos para transformar unos valores en otros. Como bien sabemos, la tecnología ha dado pasos de gigante en los últimos años, siguiendo aproximadamente la ley de Moore (formulada en 1965 por el que fue cofundador de Intel, Gordon E. Moore), que predice que el número de transistores que se pueden integrar en un circuito se dobla cada dos años, lo que provoca que la potencia de cálculo crezca exponencialmente en el tiempo. Con los ordenadores actuales podemos realizar cálculos y estudios antes apenas soñados: flujos de corrientes marinas, predicciones meteorológicas, simulaciones de líquidos, etc. ¿Qué justifica pues que se busque un ordenador cuántico, qué ventajas tiene? Si en lugar de si-

La naturaleza no es clásica, maldita sea, y si quieres simular la naturaleza, más vale que lo hagas con mecánica cuántica.

RICHARD FEYNMAN

FIG. 1

ELEMENTOS SUPERCONDUCTORES

1	H	2	He
3	Li	4	Be
5	Na	6	Mg
19	K	20	Ca
21	Sc	22	Ti
23	V	24	Cr
25	Mn	26	Fe
27	Co	28	Ni
29	Cu	30	Zn
31	Ga	32	Ge
33	As	34	Se
35	Br	36	Ir
37	Rb	38	Sr
39	Y	40	Zr
41	Nb	42	Mo
43	Tc	44	Ru
45	Rh	46	Pd
47	Ag	48	Cd
49	In	50	Sn
51	Sb	52	Te
53	I	54	Xe
55	Cs	56	Ba
57	Hf	58	Ta
59	Ta	60	W
61	Re	62	Os
63	Ir	64	Pt
65	Au	66	Hg
67	Tl	68	Pb
69	Bi	70	Po
71	At	72	Rn
73	Fr	74	Ra
75	**	76	Fr
77	Rf	78	Ra
79	Db	80	Sg
81	Bh	82	Hs
83	Mt	84	Ds
85	Rg	86	103
86	Cn	87	104
88	105	89	106
89	107	90	108
91	109	92	110
93	111	94	112
95	113	96	114
97	115	98	116
99	117	100	118
101	119	102	120
102	121	103	122

Tabla periódica de los elementos químicos que se convierten en superconductores bajo ciertas condiciones y circunstancias. Algunos elementos son superconductores si forman nanotubos o están dispuestos en finas capas.

mular objetos clásicos, como bolas de billar, nubes, el mar, etc., queremos emular el comportamiento de objetos cuánticos, como electrones, átomos, moléculas, etc., necesitaremos construir máquinas cuánticas. El argumento es el siguiente. En mecánica cuántica el número de posibilidades que explora cualquier sistema físico de forma simultánea es ingente. Y es que sistemas aparentemente tan simples como una molécula de cafeína requieren para su descripción cuántica más memoria de la que tienen hoy día todos los ordenadores del planeta juntos.

Queda claro que, para simular sistemas cuánticos, no nos basta con nuestros ordenadores actuales. Necesitamos máquinas que también funcionen según las leyes y principios de la mecánica cuántica. En particular, el más notable de dichos principios es el de superposición, que está en la raíz de las ventajas de la computación cuántica. Antes decíamos que los bits pueden tomar únicamente dos valores y que en un ordenador clásico solo es posible tener uno u otro valor cada vez. En cambio, en mecánica cuántica no existe esta limitación, por lo que es posible que nuestro estado sea cualquier superposición posible de estos dos valores. Esto viene a decir que el equivalente cuántico del bit, el *qubit*, es un objeto más complicado, que no solo es un número 0 o 1 sino que también permite ir desde completamente 0 a completamente 1, pasando por un sinfín de valores intermedios (figura 2). Con este cambio de paradigma, unido a la posibilidad de definir puertas lógicas que permitan hacer operaciones con qubits parecidas a las que existen para bits normales, se han descrito en los últimos años varios procedimientos para sobrepasar con creces nuestra potencia de cálculo actual. La dificultad está en construir estos qubits, ser capaces de conectarlos y que la tecnología permita un escalado correcto. Esto último es capital y es uno de los motivos por los que no se ha desarrollado aún el campo de la computación cuántica.

En la última década se han propuesto varios sistemas físicos susceptibles de ser utilizados como qubits. En los inicios, uno de los sistemas más prometedores era la resonancia magnética nu-

EL EFECTO JOSEPHSON

Decía el brillante físico Richard Feynman (1918-1988) que en la física de la materia condensada casi todo lo que se predecía había sido ya medido en experimentos previos. Hubo sin embargo una excepción: se trata del efecto Josephson. El nombre se lo presta su descubridor, Brian David Josephson (n. 1940), un físico tremadamente brillante que luego pasó a ser vilipendiado por dar pábulo a creencias pseudocientíficas desde su cátedra en Cambridge. Josephson quiso averiguar qué ocurriría si pusiéramos dos superconductores separados por una barrera aislante. ¿La traspasarían? Como sabemos, las nubes electrónicas de cada uno de los superconductores forman un estado en el que los electrones se aparean, formando una suerte de condensado. También sabemos que, en el mundo cuántico, las barreras pueden atravesarse con cierta probabilidad.

Efecto túnel e interacción entre superconductores

Lo que descubrió Josephson es que se da un efecto túnel que se traduce en la presencia de corrientes entre los dos superconductores, aunque cada uno de ellos sigue siendo superductor. Este efecto dio lugar a las denominadas *uniones Josephson*. Cada superconductor tiene una fase cuántica, como si cada uno de ellos fuera un péndulo. Si ambos están en la misma fase no hay transferencia de electrones entre los dos superconductores. Si por el contrario hay diferencia de fase, aparece inmediatamente una corriente. De alguna manera la diferencia de fase cuántica hace las veces de diferencia de potencial. Las uniones Josephson pueden estar en modo de carga, cuando el «tunel» es muy pequeño y cada superconductor tiene una cantidad de carga constante, o bien en modo de fase, cuando el «tunel» es muy grande y lo que está bien definido es la corriente en la unión. Una propiedad importante que debe tener cualquier tecnología cuántica utilizada para implementar qubits es que debe permitir conectar



los diversos qubits para poder realizar operaciones y montar circuitos. En el caso de los qubits de flujo superconductores esto se puede conseguir si los dos anillos, cada uno de ellos capaz de representar un qubit, están suficientemente cerca. En este caso un anillo será sensible al flujo de campo magnético producido por el otro anillo, lo que, de facto, se convierte en una forma de conectarlos.

El galés Brian David Josephson ganó el premio Nobel de Física en 1973 por predecir el efecto que lleva su nombre, que describe la aparición de una corriente eléctrica entre dos superconductores separados, generada gracias al efecto túnel.

BIT
0QUBIT
0Un bit solo puede ser
un 0 o un 1En el qubit el 0 y el 1 se superponen y pueden
representar cualquier lugar de la esfera

Diferencias entre los bits clásicos y los cuánticos (qubits).

clear. El objeto cuántico que se manipulaba para hacer cálculos era el espín de los núcleos. Lo más complicado de esta tecnología es que nunca se trabaja con solo un espín de un núcleo, sino que se manejan conjuntos de muchos espines. Pero eso hace que muchas de las ventajas de la computación cuántica se pierdan, lo que provocó que el interés por esta tecnología prácticamente desapareciera.

El siguiente sistema se basa en generar trampas de iones (ver imagen superior en página 117) para conseguir contar con iones atrapados. Los iones, cargados positivamente, se repelen entre sí, por lo que necesitan alguna fuerza que los confine. Esto se consigue mediante campos eléctricos y magnéticos que permitan tener un conjunto de iones flotando en el

QUBITS DE FLUJO SUPERCONDUCTOR

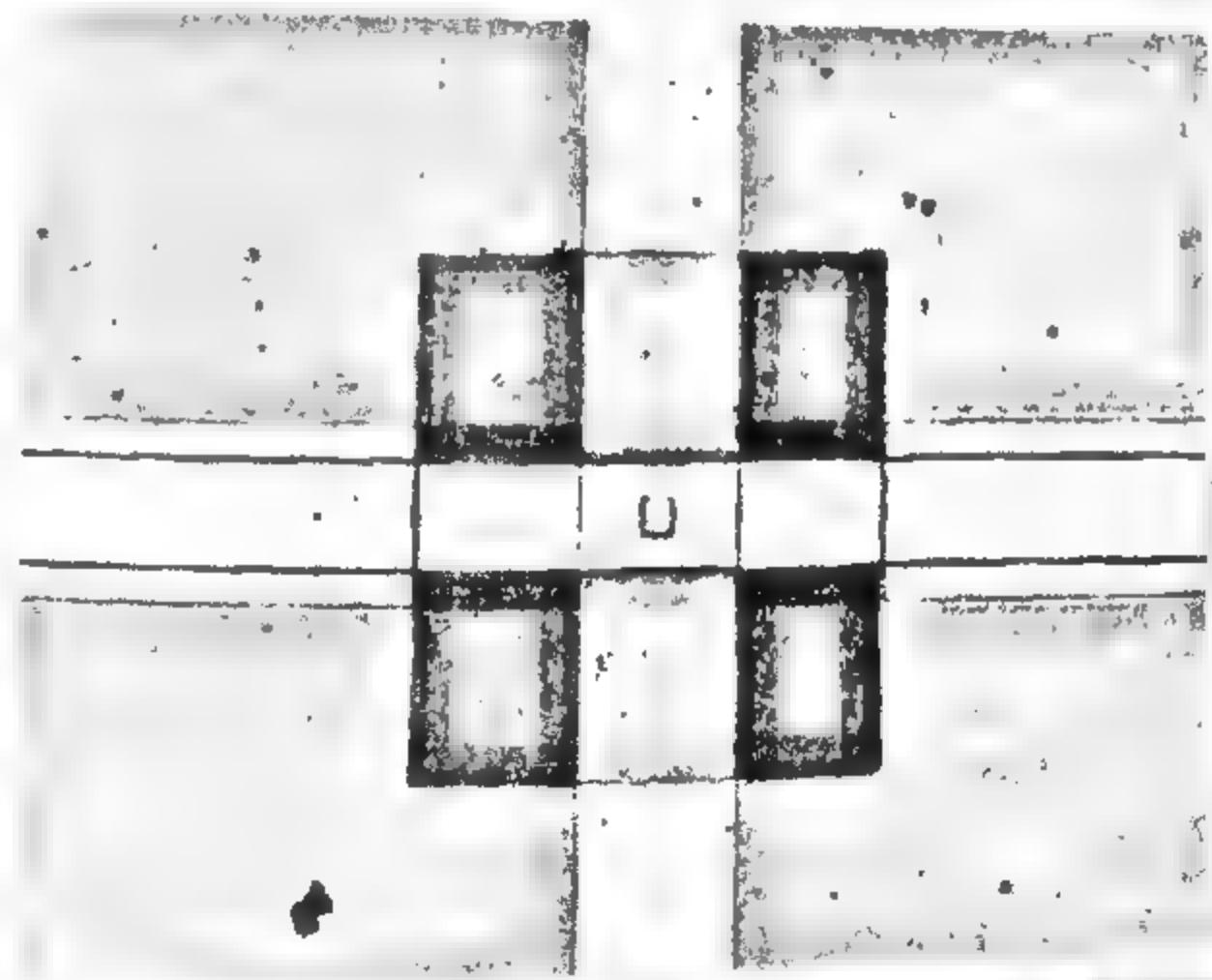
Utilizando tres uniones de Josephson se pueden crear los denominados qubits de flujo superconductores (en inglés, superconducting flux qubits). Estos fueron diseñados por el grupo del físico neerlandés J.E. Mooij y su grupo en la Universidad Técnica de Delft, en los Países Bajos, una de las universidades técnicas más prestigiosas del mundo. La idea fue conectar tres o cuatro uniones de Josephson para formar una estructura en forma de anillo en la que se pueden generar corrientes persistentes superconductoras,

Timbres, imanes y la ley de Ampère

Al girar los electrones en un anillo se genera un campo magnético perpendicular a este, según describe la ley de Ampère (ley formulada por el físico francés André-Marie Ampère en 1831, la cual relaciona el origen de un campo magnético con una corriente eléctrica estacionaria) que, de hecho es el fenómeno que hace que los timbres funcionen y que permite hacer imanes a partir de bobinas como en los motores eléctricos.

Objetivo: obtener estados cuánticos robustos

Del mismo modo, si somos capaces de cambiar el flujo de campo magnético a través del anillo, podemos modificar la corriente de los electrones. Al tratarse de un anillo superconductor, el momento angular de estos electrones que se hallan girando alrededor del anillo no puede tener cualquier valor, sino que ha de estar cuantizado. Así, tendremos que los dos estados de menor energía se corresponderán con dos giros idénticos pero realizados en sentido contrario. El grupo de Delft vio rápidamente que estos dos estados eran dos estados cuánticos muy robustos óptimos para ser utilizados como el 0 y el 1 puros del qubit.



La línea horizontal de esta unión de Josephson real es el primer electrodo y la vertical, el segundo. El cuadrado que las separa es un aislante que tiene en el centro donde se encuentran los dos electrodos una pequeña apertura a través de la cual está la verdadera unión Josephson.

El qubit actúa como puente entre el mundo macroscópico y el microscópico.

AARON D. O'CONNELL, FÍSICO CUÁNTICO

mentalmente que estas fuerzas transmitidas por la vibración del conjunto también permiten acoplar los estados internos de los iones. Este tipo de mecanismos pueden ser utilizados para construir tanto qubits como puertas lógicas y realizar cálculos con ellos. Los sistemas de iones atrapados son hoy día una de las tecnologías más prometedoras para realizar máquinas cuánticas, aunque no está claro que se puedan escalar de forma completamente satisfactoria.

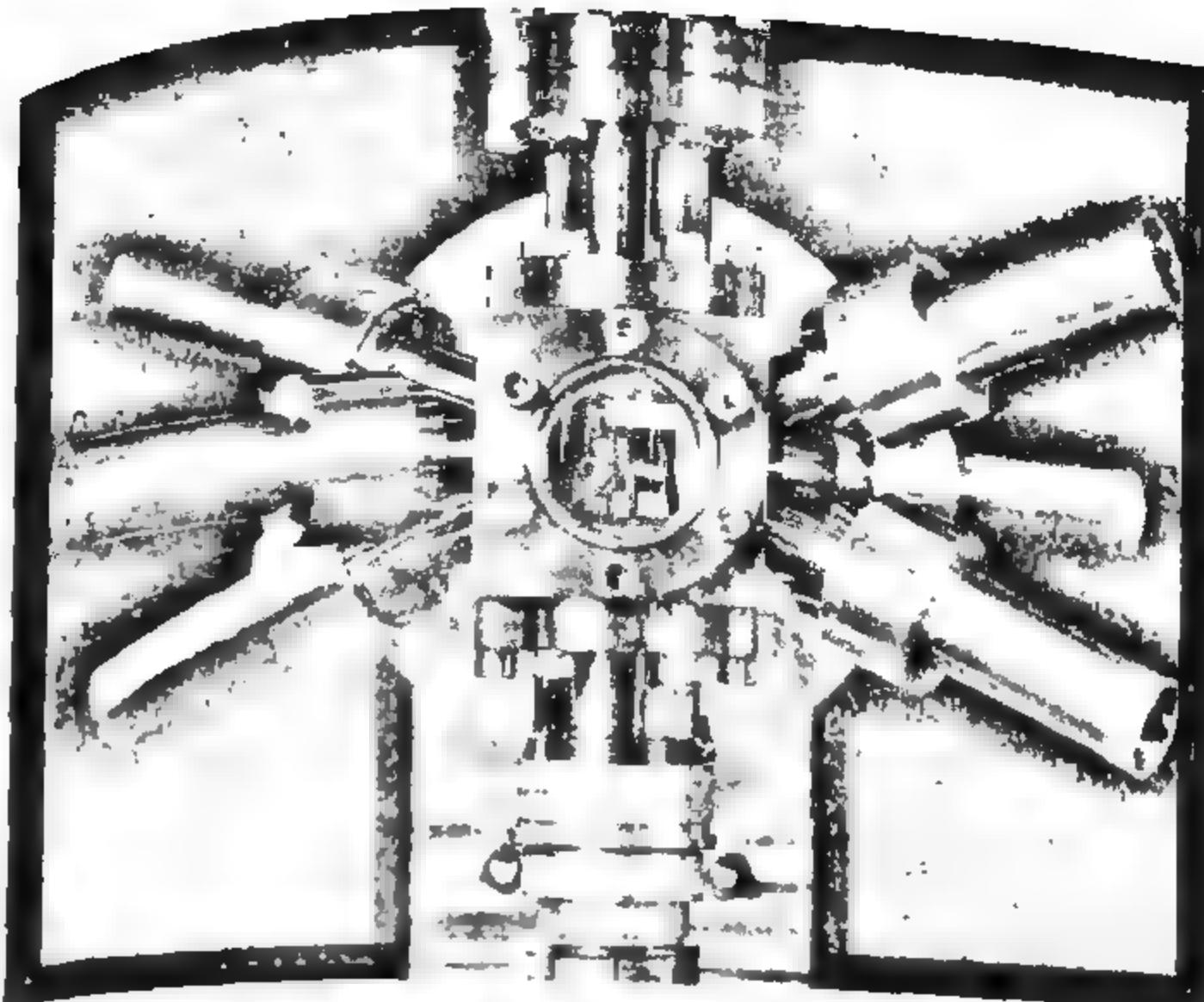
Aquí es donde entran las tecnologías superconductoras. Para volver a la superconductividad, consideraremos la temperatura que sea suficientemente baja para que los electrones del metal quieran buscar el estado de mínima energía del sistema. Bardeen, Cooper y Schrieffer demostraron que en este caso las vibraciones de la red de átomos pueden generar una pequeña atracción entre los electrones, de forma que estos últimos quieran formar parejas, los ya denominados pares de Cooper, que, al estar formados por dos fermiones, se comportan como un bosón. Una parte de estos bosones condensan a baja temperatura, formando un estado en que todos ellos se comportan exactamente de la misma manera. Y esto último es lo más importante porque un superconductor, formado por millones de electrones, se comporta como si fuera un solo estado cuántico bosónico. El físico británico Brian Josephson descubrió al respecto una consecuencia fascinante: si juntamos dos materiales superconductores dejando entre ellos una pequeña zona de material aislante se producirá el efecto túnel cuántico de algunos pares de Cooper. Lo que Josephson hizo fue teorizar el comportamiento de dos sistemas cuánticos

vacío en una configuración estable. Si consideramos un caso unidimensional, en el que todos los iones se hallen en una línea, se ha demostrado que se pueden inducir fuerzas entre ellos gracias a las vibraciones del sistema. Así, si desplazamos ligeramente uno de ellos, el ion de al lado lo notará. Del mismo modo, se ha conjecturado teóricamente y observado experimentalmente que estas fuerzas transmitidas por la vibración

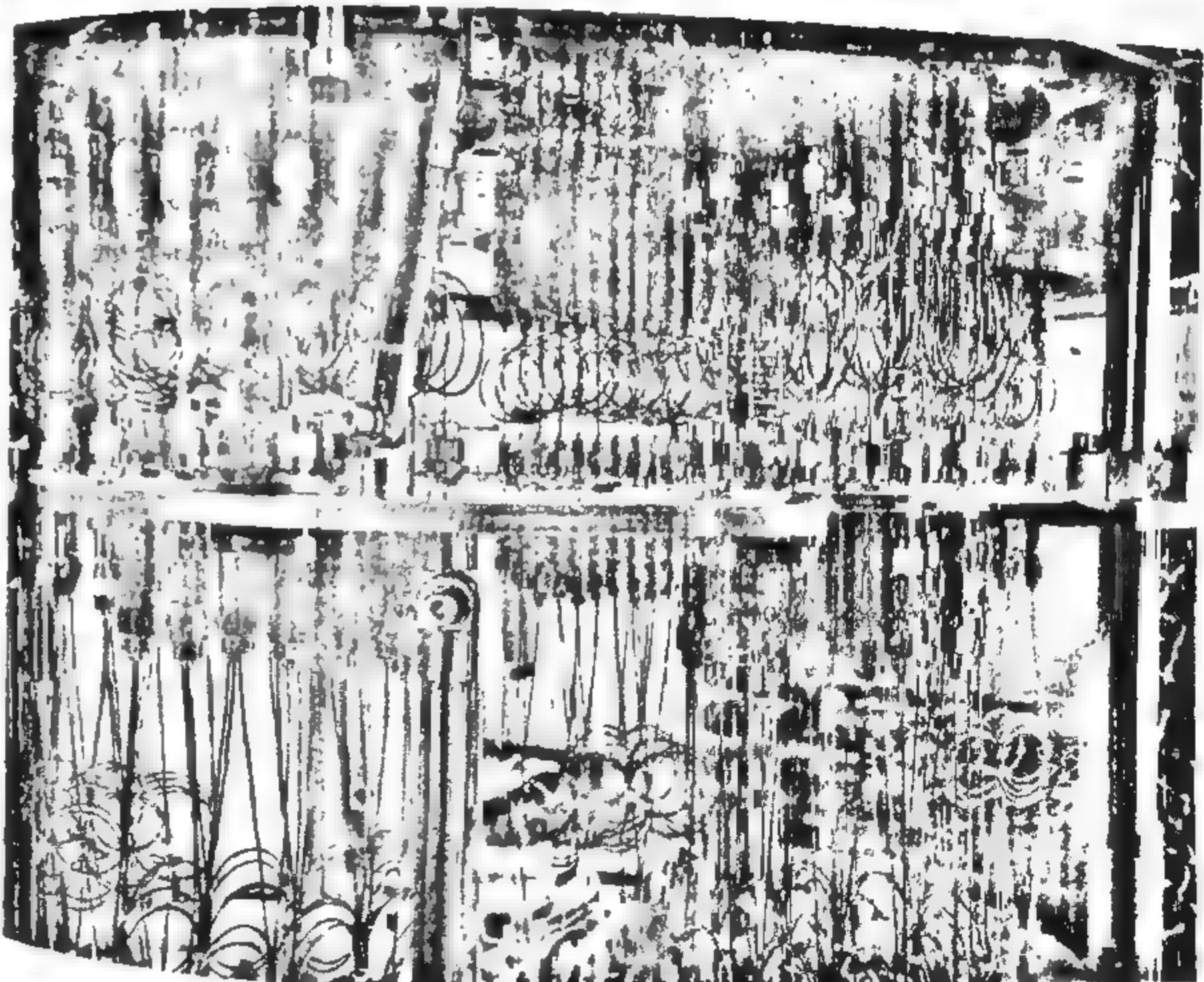
conectados mediante una unión débil. Esto es, si la barrera aislante entre ellos es demasiado ancha, los pares de Cooper no podrán atravesarla, hace falta que sea estrecha, de forma que el efecto túnel cuántico sea efectivo y proporcione una conexión entre ambos superconductores. El efecto neto es que las propiedades cuánticas de ambos superconductores pueden intercambiarse. La unión Josephson es el elemento primordial para poder construir circuitos superconductores. El siguiente paso necesario para tener qubits superconductores es conseguir sistemas cuánticos con dos niveles, que hagan las veces del 0 y el 1 puros. En sistemas superconductores se pueden conseguir estados robustos uniendo tres o cuatro uniones Josephson de tal manera que el circuito cierre un anillo. Una vez tenemos los qubits aún nos queda toda la tarea de conectarlos entre sí y manipularlos sin que pierdan las propiedades cuánticas. Para esto todo el circuito superconductor tiene que estar a muy baja temperatura, del orden del milikelvin. Estas bajas temperaturas aseguran que todo el sistema trabaje de la forma que se espera. Hasta no hace mucho el mayor inconveniente de los qubits superconductores es que el *tiempo de coherencia*, algo así como el tiempo durante el cual el sistema realmente se comporta como un sistema cuántico aislado, era tremadamente corto. Esto era debido, en parte, a que estos qubits están inmersos en otros materiales, lo que hace que aparezcan fuentes de ruido, como campos magnéticos débiles no deseados, que afectan a su comportamiento. Pero se ha avanzado mucho: si alrededor del año 2000 los tiempos de coherencia eran de pocos nanosegundos, hoy día se trabaja con tiempos de coherencia del orden del microsegundo, lo que representa una mejora en un factor 1000 en apenas diez años. Estos tiempos son suficientes para poder realizar un sinnúmero de operaciones.

Actualmente la tecnología superconductora es la más avanzada en el camino, aún incipiente, para lograr la implementación del ordenador cuántico. Lo que hasta hace no muchos años era una entelequia teórica inalcanzable está ahora a punto de convertirse en realidad y son varias las multinacionales

que se han lanzado a la producción de máquinas cuánticas utilizando tecnología superconductora. Destacan ahora mismo IBM (en la imagen inferior de la página contigua, un refrigerador criogénico de IBM para mantener las bajas temperaturas necesarias en las computadoras cuánticas), GOOGLE y la canadiense D-WAVE. La primera construyó un ordenador cuántico de 5 qubits que ha puesto a disposición de la comunidad internacional a través de una interfaz *online*. Los usuarios registrados pueden realizar pequeños circuitos cuánticos que la máquina implementa para después comparar sus resultados con los que se pueden obtener de manera teórica. Pero cinco qubits es un número bajo que limita el tipo de cálculos que pueden realizarse, por lo que IBM espera aumentar esta cantidad en el futuro próximo (de hecho, a comienzos de 2017 este gigante tecnológico aumentó de 5 a 16 el número de qubits de su prototipo). Es interesante resaltar que, en estos momentos, la máquina de IBM es, a día de hoy, el verdadero precursor del ordenador cuántico, entendido este como una máquina capaz de realizar tareas completamente diferentes según la programación. Contrastá así con las máquinas que produce la empresa D-WAVE, también utilizando tecnología superconductora. En este caso se ha conseguido ensamblar muchos más qubits en cada máquina —actualmente se habla de 2000 qubits!— aunque el procedimiento para programarlas es muy diferente. La idea es que estas máquinas pueden realizar una única tarea, encontrar el punto de menor energía en un paisaje enrevesado —parece una idea peregrina, pero casi todas las leyes de la física pueden expresarse de esta manera—. Esta peculiaridad de las máquinas de D-WAVE obliga al usuario a encontrar la forma de reformular cualquier problema que desee resolver, de modo que adopte la estructura de un cálculo de esta clase. Aunque en general esto puede conseguirse, no hay ningún algoritmo sistemático que nos permita realizar esta tarea a partir de cualquier problema planteado. De hecho, ni siquiera hay garantía de que podamos hacer siempre esta reformulación, lo que desde luego limita enormemente la potencia y utilidad de la computadora de D-WAVE.



Arriba, una trampa de iones, esencial en el estudio de estados cuánticos o la espectroscopía de masas. Abajo, el refrigerador criogénico que usa IBM para alcanzar las bajas temperaturas que requieren los aún incipientes ordenadores cuánticos.



UNA META PARALELA: LOS LABORATORIOS DE ÁTOMOS ULTRAFRÍOS

En los años ochenta del siglo pasado se produjo uno de los descubrimientos que más han ayudado a conocer el comportamiento de la materia a escala atómica: el descubrimiento del enfriamiento láser. La idea fundamental es sencilla: dado que los átomos se desplazan en todas direcciones, si los iluminamos con un láser, siempre desde el sentido opuesto a su movimiento, conseguiremos frenarlos poco a poco, bajando su velocidad y, por tanto, su temperatura. No entraremos en los detalles tecnológicos del método, que sin duda escapan a los objetivos de esta publicación, pero sí mencionaremos que abrió la puerta a toda una nueva clase de experimentos con átomos. Hasta ese momento, lo habitual en los laboratorios de frío era almacenar gases y líquidos a muy baja temperatura en recipientes muy aislantes, como los termos de café. De ese tipo de laboratorio hemos pasado en pocos años a otros en los que lo primero que vemos son grandes mesas llenas de haces de luz láser. El gas ultrafrio —estamos hablando de pocos microkelvins— ya no se encuentra en termos aislantes sino que está directamente colgado en el vacío, sostenido por la luz coherente de los láseres y algunos campos magnéticos.

En gran medida, estos avances que han permitido frenar los átomos y al mismo tiempo atraparlos en el vacío mediante haces de luz láser surgen como consecuencia directa de entender la forma en que los haces láser interactúan con los átomos. De forma muy escueta, como ya se ha comentado, los electrones del átomo van llenando los distintos estados cuánticos. Los electrones de las capas más alejadas del núcleo tienen más energía que los más cercanos al mismo. Con esta estructura, el átomo puede absorber energías de forma discreta al promocionar algún electrón de las últimas capas a estados de mayor energía. La luz láser hace justo eso. Si tenemos un haz de una cierta frecuencia —a su vez directamente relacionada con su color— podremos excitar determinadas transiciones de algunos átomos concretos. Así jugando con este toma y daca energético entre el haz láser y los

átomos, y añadiendo el efecto de campos magnéticos variables, podemos frenarlos y atraparlos en el vacío en las configuraciones geométricas que deseemos.

Con estas técnicas se consiguió preparar en 1995 el primer condensado de Bose-Einstein. Ya hemos comentado anterior-

El electrón ya no puede concebirse como un pequeño gránulo de electricidad; debe asociarse a una onda, la cual no es un mito; su longitud de onda puede ser medida, y sus interferencias, predichas.

Louis de Broglie

Aquel experimento, junto con el realizado ese mismo año por el físico alemán Wolfgang Ketterle (n. 1957) del Instituto Tecnológico de Massachusetts, consiguió demostrar la existencia de los condensados de Bose-Einstein que, hasta entonces, eran poco más que un juego matemático. Esto fue un gran avance, en particular de la física cuántica de muchas partículas —a la sazón llamada *mecánica estadística cuántica*—. Se había sintetizado un nuevo estado de la materia cuyas características lograban llevar el extraño comportamiento de la mecánica cuántica hasta tamaños casi observables por el ojo humano desnudo. De forma simultánea, estos experimentos abrieron la puerta a estudiar el mundo atómico con un grado de control desconocido hasta entonces.

Pocos años después, el campo de investigación en gases ultrafrios sufrió una segunda revolución. En 1998 el grupo del físico teórico austriaco Peter Zoller de la Universidad de Innsbruck de Austria propuso un método para estudiar la transición entre

un estado superfluido y otro aislante en estos sistemas. La clave era conseguir atrapar los átomos de otra forma: en lugar de usar trampas parabólicas, como el bol que comentábamos más arriba, se trataba de hacerlo en las denominadas *redes ópticas*. En concreto, las redes ópticas son cristales de luz. Al interferir varios haces láser se puede conseguir que el patrón de interferencia sea una estructura tridimensional ordenada, como una huevera en el caso bidimensional. Cuando se introduce un gas ultrafrio dentro de esta red láser, sus átomos quedan atrapados en las zonas de más (o menos, dependiendo del láser y del átomo) intensidad luminosa, formando una estructura ordenada de átomos flotando en el vacío. Estos sistemas formados por átomos fríos situados de forma periódica en el espacio son lo más cerca que estamos de producir materiales átomo a átomo. De esta manera tenemos, *grosso modo*, dos tipos de experimentos. En los primeros, los átomos son confinados en regiones sencillas, básicamente de forma parabólica, consiguiendo un sistema análogo a tener un vaso de helio superfluidio. En cambio, en el segundo caso los átomos están atrapados en redes ópticas, generando un sistema similar a un sólido cristalino donde los iones conforman una red mientras los electrones pueden moverse a lo largo de la estructura.

Mediante los experimentos del primer grupo se ha podido estudiar cómo se produce la superfluidez. Ya explicamos anteriormente los experimentos del grupo encabezado por el físico J. Dalibard en los que se hacía girar un gas compuesto por átomos ultrafrios mediante el equivalente a una cuchara en una taza de café. En ellos se observaba la formación previa de pequeños remolinos, antes de llegar a formar un gran remolino en el centro del sistema cuyo giro se mantiene incluso al retirar la cuchara. Anteriores a estos fueron los experimentos del grupo del profesor Ketterle, que recibió el Premio Nobel junto a Cornell y Wieman, a finales del siglo xx. En sus experimentos hicieron lo siguiente. Primero prepararon un condensado de Bose-Einstein más o menos estándar. Despues utilizaron un haz láser para hacerlo servir como obstáculo. Si introducimos un palo en un líquido normal, por ejemplo un estanque, y lo desplazamos en

línea recta, veremos que se forma una estela y que las moléculas del líquido se calientan ligeramente por donde pasa el líquido. El efecto es básicamente el efecto Joule que ya discutimos en el primer capítulo. En un líquido superfluidio (cuya conductividad térmica, recordemos, se ha vuelto infinita) se espera que haya una velocidad crítica a partir de la cual el líquido se caliente ligeramente al pasar el objeto, mientras que a velocidades menores no se debería observar nada. En los experimentos de Ketterle y sus colaboradores se observó esta fenomenología con gases de unos diez millones de átomos atrapados en un volumen de 60 micrómetros de diámetro, en los que se observó que la velocidad crítica era del orden de milímetros por segundo.

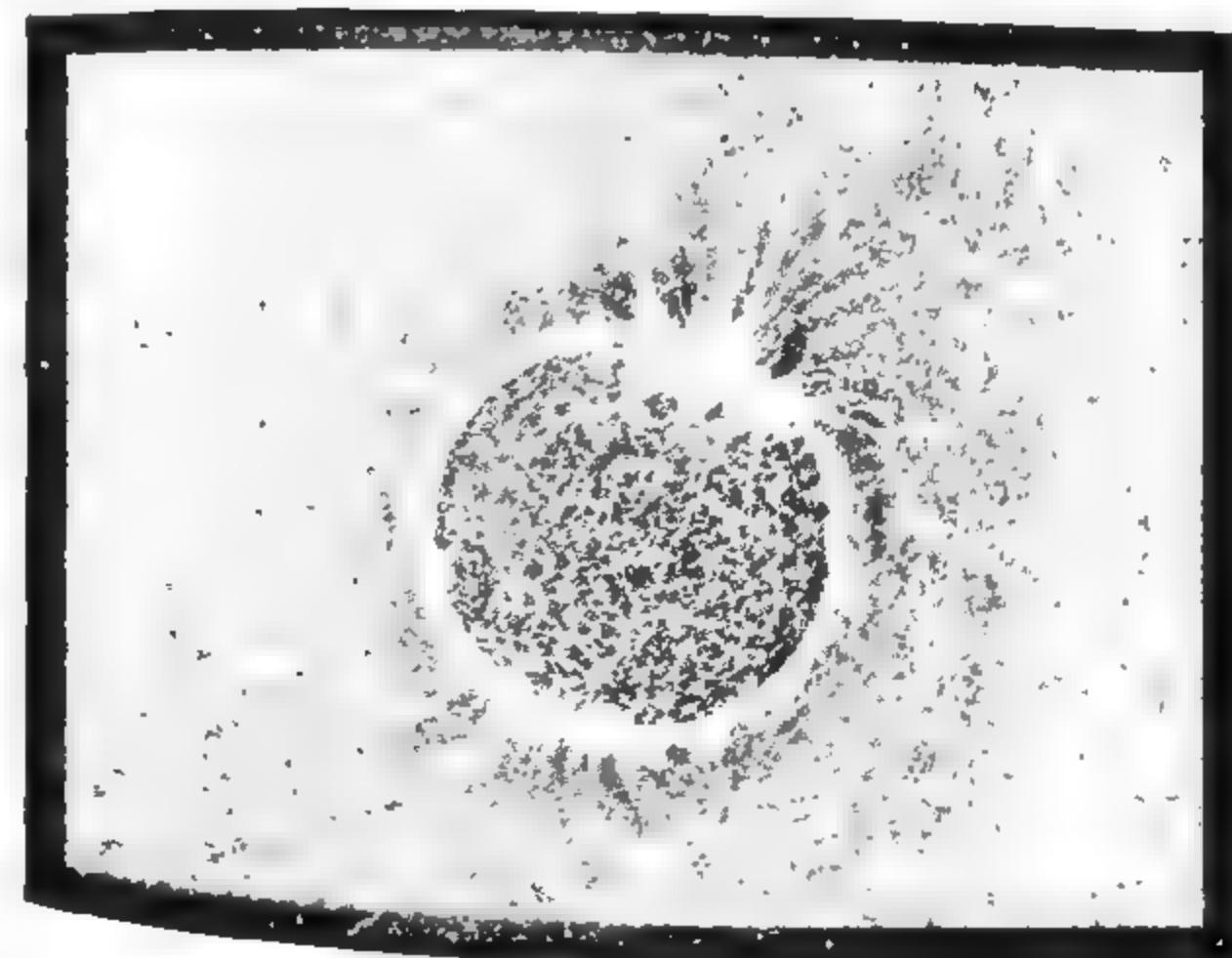
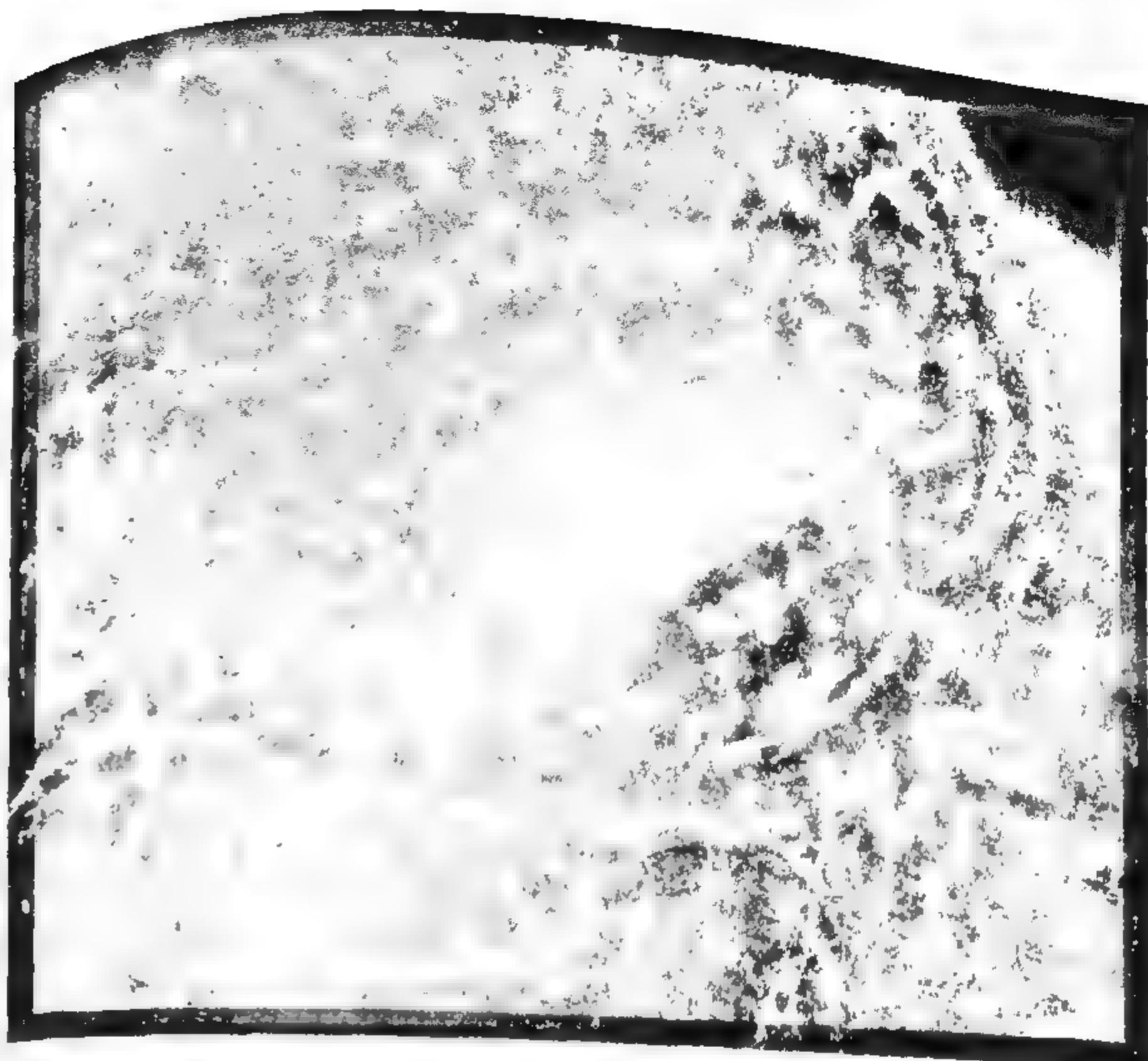
Hemos mostrado solo algunos ejemplos, aunque hay muchos otros en los que se está poniendo a prueba la superfluidez de los gases ultrafrios con la intención de entender qué ocurre exactamente a nivel microscópico. Del mismo modo que hablábamos de los materiales superconductores como paradigma actual para realizar ordenadores cuánticos, también debemos mencionar los sistemas de átomos ultrafrios como el marco más prometedor para conseguir simuladores cuánticos, sensores cuánticos y, quizás, también versiones sencillas de computadores cuánticos. La gran ventaja de esta tecnología es que los átomos están tremadamente aislados, lo que hace que las propiedades cuánticas aguanten tiempos del orden del segundo. Esto es casi un millón de veces más que lo que sucede mediante tecnologías superconductoras. El mayor problema es que se requieren sistemas ultrafrios no convencionales que consigan temperaturas del orden del nanokelvin, mientras que los superconductores «solo» necesitan sistemas de refrigeración para bajar a temperaturas de milikelvin, algo que hoy día se puede conseguir mediante artefactos comerciales.

EN EL CORAZÓN DE LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES

Los dos ejemplos de superconductores y superfluidos mencionados pertenecen al ámbito científico/tecnológico y son siste-

mas realizados por el ser humano. Sin embargo, encontrar sistemas superconductores o superfluidos naturales no es nada sencillo. En la Tierra no existe ningún lugar donde haya un río superfluido o una roca superconductora de forma natural. En nuestro entorno, léase el sistema solar, puede que haya algún tipo de superfluidez en alguno de los puntos más fríos registrados, pero, en la actualidad, se cree que donde pueden aparecer de forma natural esta clase de superconductores es en las estrellas de neutrones.

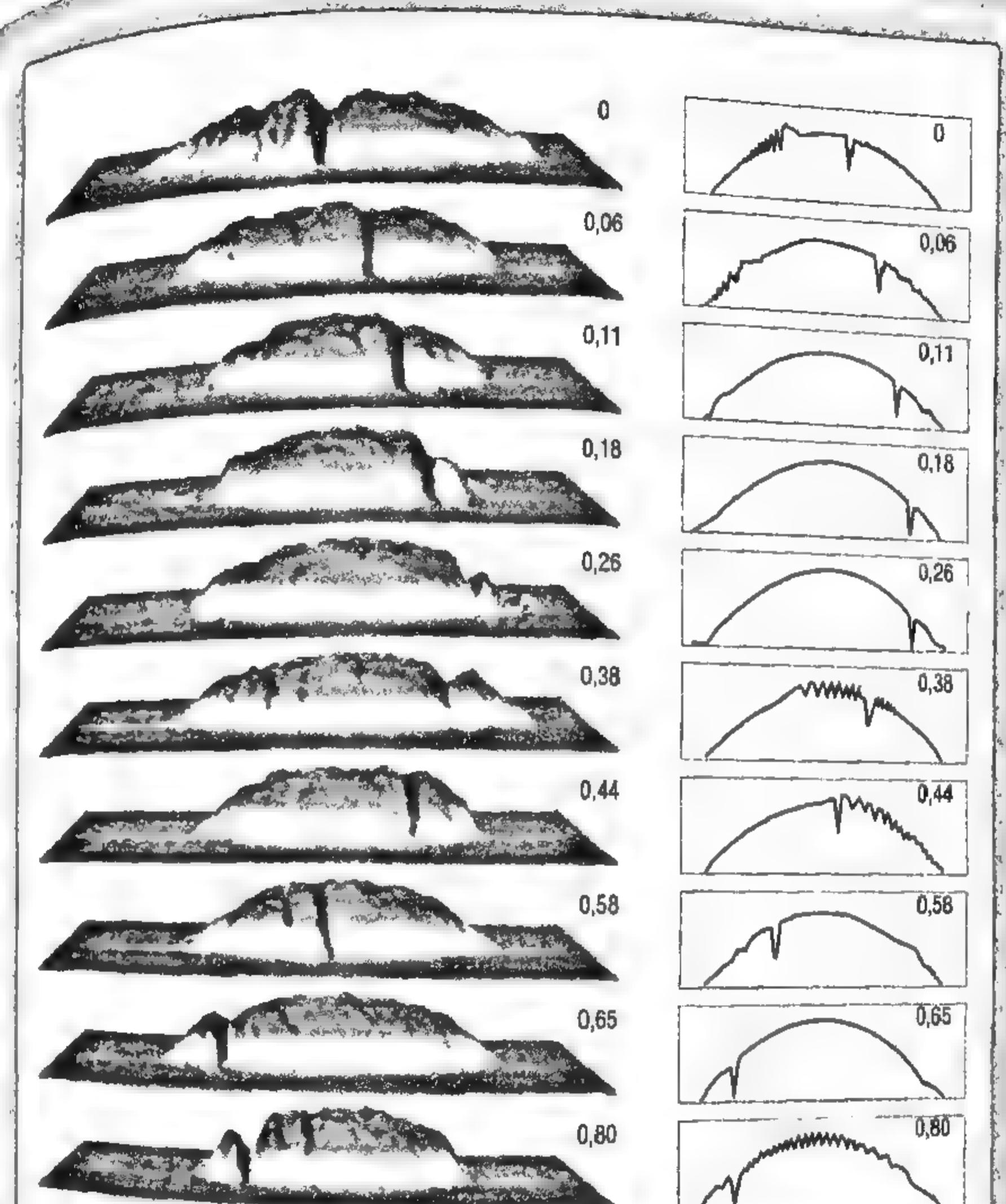
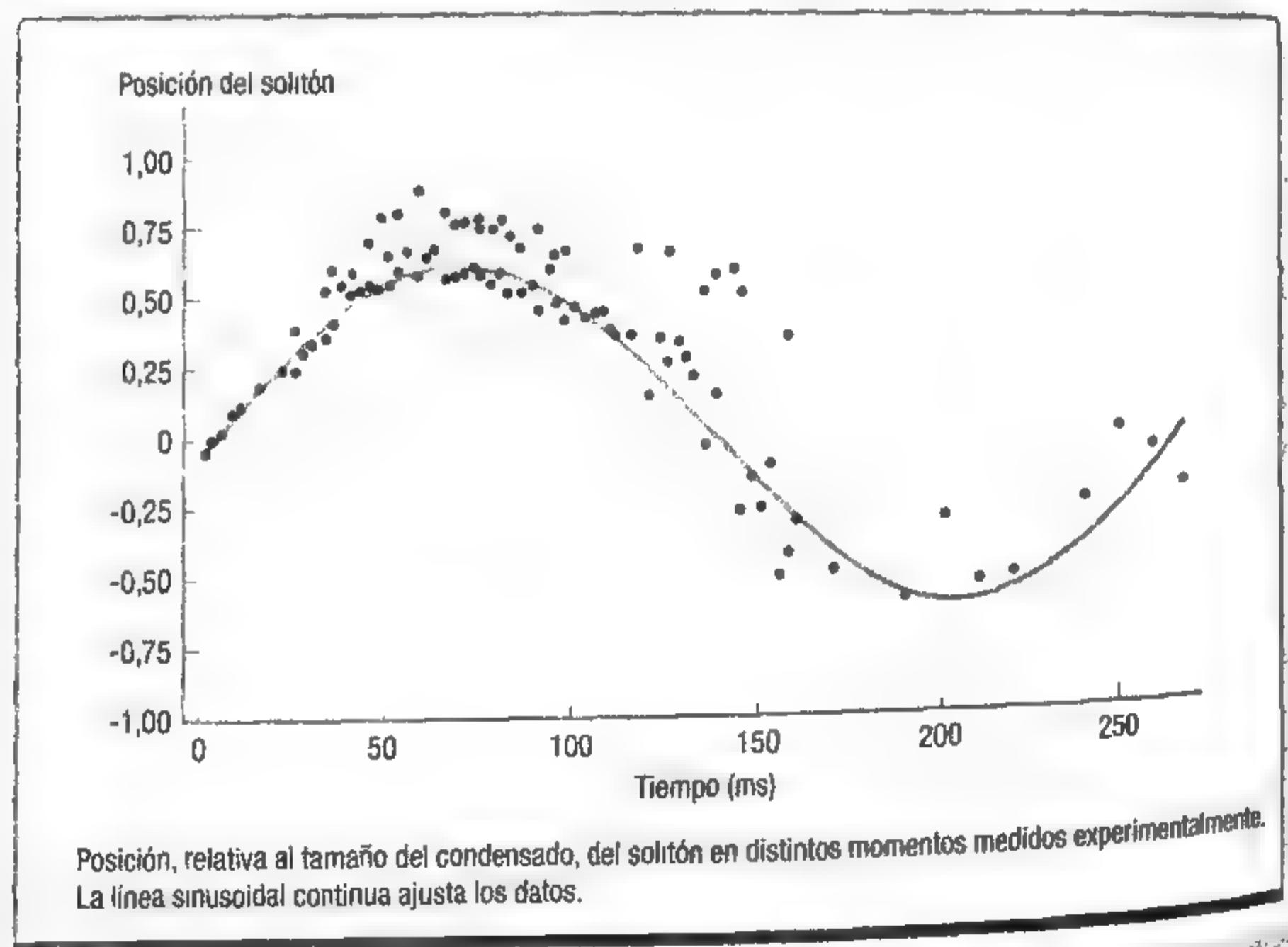
Estos densos objetos celestes son remanentes de supernovas, gigantescas explosiones de estrellas una decena de veces más masivas que nuestro Sol. Al explotar, la estrella lanza al espacio una gran parte de su masa, quedando un núcleo al descubierto que se comprime por acción de la gravedad. Dependiendo de la masa de la estrella original, el núcleo remanente se comprimirá hasta convertirse en una enana blanca, en una estrella de neutrones (ver una recreación artística de una de ellas en la imagen inferior de la página contigua) o en un agujero negro. El primer caso será lo que le ocurrirá al Sol cuando le llegue el momento. Tras convertirse en una gigante roja, su núcleo empezará a contraerse debido a la gravedad hasta que el proceso se frene debido al principio de exclusión de Pauli. Es decir, en un momento dado, las densidades serán tan altas que los electrones empezarán a estar demasiado cerca, pero como sabemos gracias a la formulación que hizo el físico austriaco, dos electrones no pueden ocupar el mismo estado cuántico. Ese fenómeno hace que las enanas blancas se estabilicen. Aunque parezca sorprendente, los electrones, que son muy livianos y no aportan apenas masa en cantidad apreciable en comparación con la enorme masa de los núcleos atómicos, son los que sostienen la presión gravitatoria. Son electrones que pueden considerarse libres, formando un mar de Fermi. Curiosamente, la presión cuántica que realizan los electrones no es capaz de aguantar cualquier presión imaginable sino que la relatividad impone un límite. Este límite establece la masa máxima que puede tener una enana blanca y se denomina *límite de Chandrasekhar* en honor al físico



Arriba en el centro de la Nebulosa del Cangrejo, resplandece una potente estrella de neutrones, la que hay ubicada a la derecha de la estrella más brillante. Es el remanente de la explosión de una antigua supernova. Abajo, recreación artística de uno de estos cuerpos celestes extraordinariamente masivos.

SOLITONES OSCUROS EN CONDENSADOS DE BOSE-EINSTEIN

Los condensados de Bose-Einstein presentan una gran ventaja desde el punto de vista teórico. Como todos los átomos hacen exactamente lo mismo, o «bailan» según la misma «partitura», describiendo solo a uno de ellos podemos saber el comportamiento de todos los demás. Esto simplifica notablemente la descripción y nos permite explicar casi todo lo que les ocurre haciendo teorías de campo medio. En este tipo de teorías, el efecto del conjunto sobre uno de los elementos se considera un promedio. Por ello, se dice que el efecto de la interacción entre los átomos del condensado es un efecto promedio. De alguna forma, el resultado final es que la energía de uno de los átomos será mayor si está cerca de otros, lo que puede escribirse en nuestra teoría de campo medio como un término no lineal. La no linealidad lleva a procesos de retroalimentación. En biología, por ejemplo, si un individuo tiene una ligera ventaja a la hora de encontrar comida, se alimentará mejor, lo que hará que tenga más fuerza y, ello, a conseguir aún más alimento y así sucesivamente. Uno de los efectos más sorprendentes que devienen de la interacción de los átomos en los gases ultrafríos es que determinados agujeros hechos en el condensado de Bose-Einstein unidimensional se mantienen. El grupo encabezado por el físico alemán Klaus Sengstock de la Universidad de Hannover estudió este tipo de fenómenos en condensados con forma de puro, alargados. Los investigadores observaron un agujero (un solitón oscuro) que se mueve por el fluido (ver figura inferior y derecha) sin casi deformarse.



Oscilaciones de solitones oscuros en un condensado de Bose-Einstein atrapado. Las figuras de la izquierda muestran el perfil de densidad a diferentes tiempos de la evolución. Se observa como el solitón se desplaza hacia la derecha, rebotando en el extremo del condensado. En las figuras de la derecha se muestra una proyección de las densidades de la izquierda para ver el solitón con más claridad.

indio Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995), que realizó los cálculos pertinentes.

Si, como dijimos, la masa original de la estrella es bastante mayor que la del Sol, entonces los electrones no podrán aguantar la presión y el núcleo se comprimirá hasta alcanzar densidades muy superiores a las que tienen las enanas blancas. Concretamente, la densidad de la estrella llegará al valor de la densidad de los núcleos atómicos. Recordemos que el átomo tiene un tamaño del orden de un angstrom, 0,0000000001 metros, mientras que el núcleo es unas 100 000 veces menor. Esto significa que las estrellas de neutrones consiguen empaquetar una masa tan brutal como la del Sol en una bola de apenas 10 km de radio, generando densidades cuyo valor se dispara hasta los 100 000 000 000 000 000 kilogramos por metro cúbico, característicos de la materia nuclear. Masas tan enormes y tan concentradas generan un campo gravitatorio intensísimo. ¿Y qué evita que dicho campo comprima indefinidamente a estas estrellas de neutrones? Pues bien, como su propio nombre indica, estas estrellas están compuestas mayoritariamente por neutrones, que son fermiones, de modo que lo que contrarresta la atracción gravitatoria es, de nuevo, el principio de exclusión de Pauli: dos neutrones no pueden ocupar el mismo estado cuántico, lo que limita las distancias y las velocidades que pueden tomar cuando están en su estado más estable. Es exactamente el mismo mecanismo que detiene la contracción gravitatoria de las enanas blancas, solo que en estas son los electrones y no los neutrones los protagonistas de la heroicidad. Cabe señalar que, mientras que para las enanas blancas la descripción que hemos dado es muy precisa, siendo el principio de Pauli entre electrones el único responsable de contrarrestar la atracción gravitatoria, en las estrellas de neutrones también juega un papel la interacción entre las partículas que le dan nombre. La interacción fuerte entre neutrones y protones tiene gran incidencia en la estabilidad de estas estrellas. Nuestro desconocimiento actual de algunas facetas de la fuerza fuerte se traslada en este caso a que no sepamos con exactitud la relación entre el radio de las estrellas de neutrones

y su masa. Invirtiendo el argumento, aunque pueda parecer extraño, en estos momentos medir con precisión los radios y las masas de estos objetos es una de las mejores maneras de afinar nuestros modelos sobre cómo interactúan entre sí neutrones y protones.

Cuando una estrella inicia su contracción porque ha agotado todo su combustible nuclear, la rotación de su núcleo aumenta debido a la conservación del momento angular. Es exactamente el mismo fenómeno que explica que los patinadores cambien su velocidad de rotación al abrir o cerrar los brazos mientras giran sobre sí mismos. Este mecanismo provoca que las estrellas de neutrones tengan tasas de rotación altísimas al formarse, del orden de una vuelta por segundo. Estamos, pues, hablando de objetos excepcionales, esferas masivas de pocos kilómetros de diámetro girando a gran velocidad. Son estrellas que *pulsan* en el firmamento, más o menos como cuando vemos en la lejanía un faro cuyo brillo sube y baja periódicamente, lo que les valió ganarse el nombre de *pulsar*. Este fenómeno fue descubierto en 1967 por la astrofísica norirlandesa Jocelyn Bell Burnell (n. 1943) y el radioastrónomo británico Antony Hewish, quien era su tutor de tesis. Lo que midieron fueron señales de radio que llegaban a intervalos de 1,3 segundos. Esto era algo completamente inesperado y difícil de explicar en esa época. En un primer momento la propia Jocelyn Bell explicó que no podían descartar que fuera una señal producida por alguna civilización extraterrestre, lo que, según parece, motivó que inicialmente denominaran al pulsar con las siglas LGM-1 (*Little Green Men*, «pequeños hombrecillos verdes»). En la actualidad se han encontrado varios miles de pulsares más, lo que llevó a descartar la hipótesis alienígena. De hecho, el nombre de este primer pulsar pasó de LGM-1 al menos poético (y también menos especulativo) PSR B1919+21.

Aunque las estrellas de neutrones tienen una temperatura muy elevada, del orden de los 600 000 kelvin, resulta ser relativamente baja en relación a los procesos físicos extremos que se producen en su seno. Tanto es así que parte de los neu-

trones pasan a ser superfluidos, por un mecanismo similar al que explica la superfluidez del He 3: la formación de pares de Cooper, que en este caso son parejas de neutrones ligados por las componentes de largo alcance de la interacción nuclear fuerte. Esta fuerza es la responsable de que los núcleos atómicos existan, ya que mantiene unidos neutrones y protones, oponiéndose al potente efecto repulsivo de la interacción electromagnética, que por sí sola provocaría que los protones se separasen y salieran despedidos de los núcleos. Además, tiene mecanismos para atraer los neutrones suavemente, dando lugar a la formación de pares de Cooper de tamaño mucho mayor que los propios neutrones, como ocurre con los electrones en el caso de la superconductividad, siempre que la temperatura sea suficientemente baja. Como quedó implícito anteriormente, el hecho de ser baja o alta depende siempre de con qué la comparemos. La interacción fuerte es tremadamente intensa, lo que hace que, para superarla, se necesiten grandes temperaturas. Para hacernos una idea, la energía de ligadura del núcleo compuesto más pequeño, el deuterón, es de $-2,23$ MeV. Esta energía será la que necesitaría el deuterón para separar y liberar el protón y neutrón que contiene. Si queremos que este proceso de fisión sea provocado por la temperatura (de modo que esa energía proceda de la agitación térmica) necesitaríamos valores del orden de 100 millones de grados. Comparado con ese valor, los 600 000 K del interior de la estrella de neutrones parecen poco. De hecho, podemos decir que las temperaturas de la estrella de neutrones son realmente bajas, tanto que casi no inciden en los cálculos.

Con todo lo que sabemos, hoy se estima que en las estrellas de neutrones hay mares superfluidos de neutrones, en los cuales pueden formarse remolinos y tener lugar fenómenos como los que se dan en los gases ultrafríos. Son, sin duda, el mayor y más exótico laboratorio de superfluidez del universo.

En la imagen superior de la página 123, una de ellas —la estrella más a la derecha de las dos tan brillantes ubicadas en el centro de la fotografía— refulge en el corazón de la Nebulosa del

Cangrejo, conocida por el público por los fabulosos y estéticos filamentos de su parte exterior. La explosión que originó a esta espectacular nebulosa fue registrada por primera vez en 1054 por astrónomos chinos y árabes. Pero la nebulosa, como tal, fue descubierta en 1731 por el astrónomo inglés John Bevis.

Lo que el futuro nos depara

Las posibilidades que brindan la superconductividad y la superfluidez son infinitas y, por ello, los líquidos cuánticos jugarán un relevante papel en los desarrollos tecnológicos del futuro. Recorramos algunas de las ideas que hoy parecen tener un mayor porvenir.

Ahora que conocemos con cierta solvencia los fenómenos de la superfluidez y la superconductividad de Tipo I es el momento idóneo para hacer un alto en el camino y repasar qué hemos aprendido. Para empezar, ambos fenómenos aparecen a bajas temperaturas. Esto es así porque son manifestaciones de la naturaleza cuántica de la materia que, en general, quedan enmascaradas cuando trabajamos con los grandes —y calientes— sistemas macroscópicos que nos rodean. Son fenómenos que, además, se relacionan con un estado de la materia al que no estamos habituados: el condensado de Bose-Einstein, un estado que solo aparece en sistemas de partículas de espín entero —bosones— cuando estas se precipitan en el nivel más bajo de energía que pueden ocupar. Es decir, cuando se enfrián lo suficiente. En el caso del abundante He 4, un líquido formado por partículas que se comportan como bosones, su transición a superfluido ocurre apenas un grado y medio por debajo de su ya de por sí baja temperatura de fusión. Sin embargo, ya vimos que los electrones de un metal son fermiones, por lo que deben emparejarse formando bosones antes de que se produzca la transición al estado superconductor. Este emparejamiento ocurre mediante la inte-

racción con las vibraciones de la red sólida, pero el intercambio de energías es tan pequeño que solo se aprecia a temperaturas muy bajas.

Este mecanismo de emparejamiento —la teoría BCS— abre una puerta interesante a la hora de estudiar otros sistemas formados por fermiones. Como ya vimos, el mismo mecanismo que explica la superconductividad es el responsable de la superfluidad del He 3. De este modo, sabemos que un sistema líquido, ya esté formado por bosones o incluso por fermiones, puede sufrir una transición de fase de fluido a superfluido cuando disminuyamos suficientemente su temperatura. La pregunta que surge es si este fenómeno se da solo en el helio o si es posible que ocurra en algún otro fluido. Por ejemplo, podríamos plantearnos si existen el N₂ o el O₂ superfluidos. Son moléculas constituidas por un número par de fermiones, por lo que se trata de partículas de espín entero. Si bajásemos su temperatura, ¿qué ocurriría? Antes de estudiar este caso en un laboratorio, pensemos en qué diferencias notables hay entre estos gases y el helio. Una evidente es que los primeros están formados por moléculas diatómicas unidas por fuertes enlaces covalentes, mientras que en el helio los átomos se mantienen siempre aislados, pero esto no tiene verdadera importancia en este problema. Una diferencia que sí es vital es que el helio es siete veces más ligero que el nitrógeno y ocho veces más ligero que el oxígeno. Esto significa que los efectos cuánticos serán mucho más difíciles de ver en estos elementos. Por tanto, si esperamos encontrar nitrógeno u oxígeno superfluidos deberá ser a temperaturas inferiores a los 2,17 K de transición del He 4. Sin embargo, mientras que el helio se mantiene líquido hasta los 2 K, el oxígeno se solidifica a los 54 K y el nitrógeno a los 63 K. Es decir, el oxígeno jamás podrá comportarse como superfluido porque, antes de que eso ocurra, ya se habrá solidificado. Y lo mismo ocurrirá con el nitrógeno y demás moléculas diatómicas «pesadas», como las del cloro o el flúor.

En cierto modo, lo que se observa a bajas temperaturas es que tenemos dos transiciones de fase que compiten una con la otra. Por un lado se da la transición líquido-sólido y, por otro, la transición fluido-superfluido. Para que se den ambas debe ocurrir que

SUPERFLUIDOS DE ALTA TEMPERATURA A... 50 NANOKELVIN

Como ya sabemos, en el interior de las estrellas de neutrones se dan temperaturas de decenas de miles de kelvin y en ellas los neutrones formaban superfluidos de alta temperatura. Pero hay «otros superfluidos de alta temperatura». Cuando determinados átomos y moléculas se convierten en superfluidos es a consecuencia de estar sometidos a determinadas condiciones. En realidad, lo importante para que ocurra la transición fluido/superfluido es que la energía necesaria para formar un par de Cooper sea mucho mayor que la energía térmica existente. En el caso de los neutrones, esta energía es enorme, lo que hace que si tuviéramos un líquido de neutrones a temperatura ambiente, este se comportaría como un perfecto superfluidio. El problema está en que, a esa temperatura ambiente, los neutrones se hallan siempre ligados a otros neutrones y protones en el interior de los núcleos atómicos. Para que los neutrones estén solos hay que romper la ligadura de la interacción fuerte.

Temperaturas altas o bajas... ¿respecto a qué?

En la actualidad hay varios grupos de investigación que trabajan en superfluidos de alta temperatura aunque, paradójicamente, esta se produce a tan solo 50 nanokelvins. No parece una temperatura muy elevada. Sin embargo, los científicos del grupo encabezado por el físico alemán Wolfgang Ketterle (en la imagen), uno de los premiados con el Premio Nobel por hacer un condensado de Bose-Einstein con gases atómicos ultrafrios y profesor en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, Estados Unidos, la compararon con la energía de ligadura de los pares de Cooper y con la energía que tiene el fermión demásaltenergiadelgas(energíade Fermi). Lo que descubrieron es que se puede conseguir superfluididad a temperaturas de hasta dos órdenes de magnitud mayores que la temperatura de Fermi del conductor. De ahí que se denominen de «alta temperatura». Todo, como casi siempre, es relativo.



En la fotografía, Wolfgang Ketterle, quien ganó el Nobel de Física en 2001 junto a Eric A. Cornell y Carl E. Wieman.

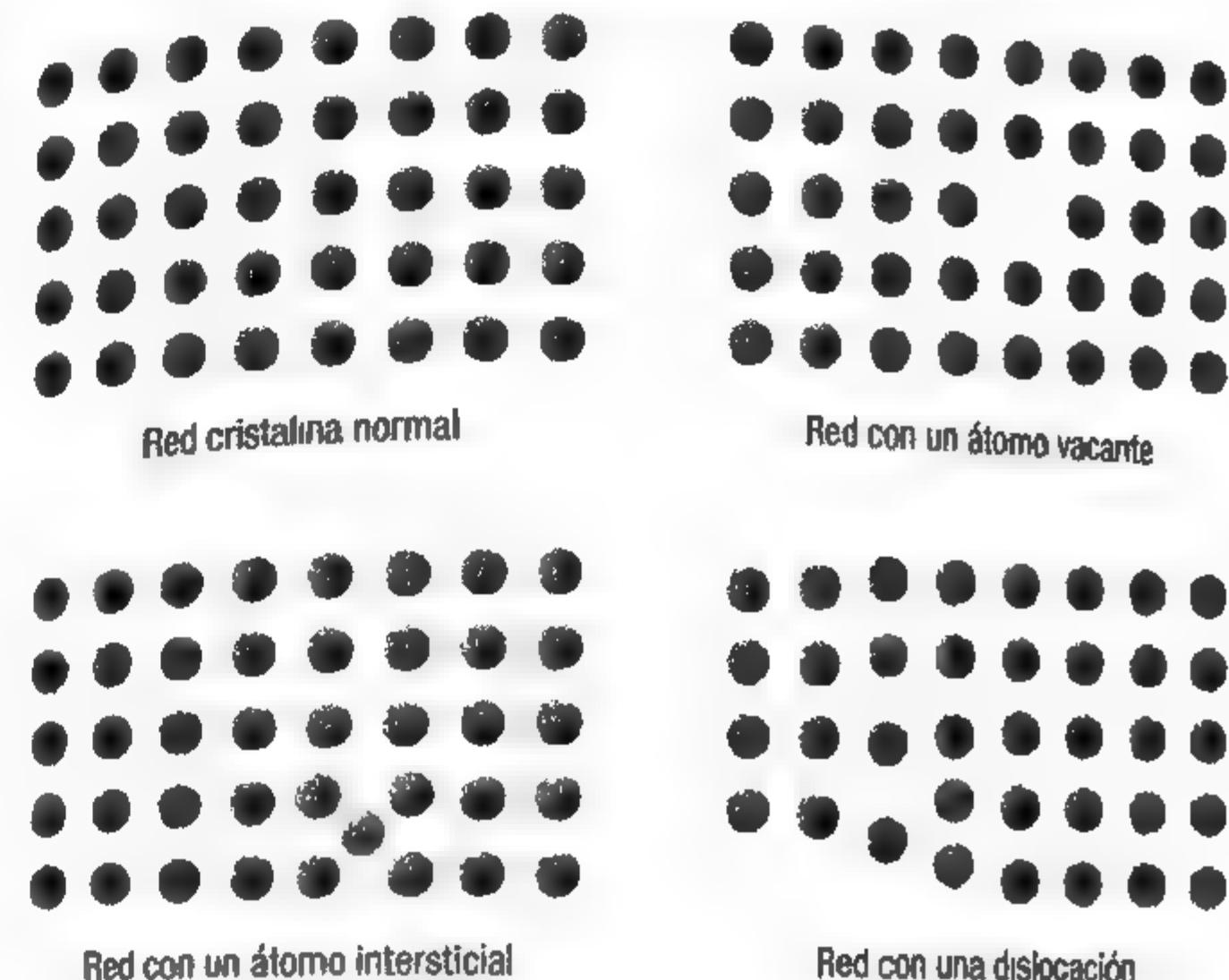
la sustancia se mantenga líquida a temperaturas cercanas al cero absoluto. De ese modo, cuando bajamos su temperatura, puede pasar de fluido a superfluido y luego a sólido. Sin embargo, el paso al estado sólido suele producirse a una temperatura relativamente alta, de modo que la segunda transición no llega a darse. Así, si queremos buscar elementos y compuestos superfluidos, debemos hacerlo entre aquellos que cumplen al menos una de estas dos condiciones. La primera, que formen moléculas más ligeras que el helio; la segunda, que se mantengan líquidos por debajo de la temperatura de fusión del helio. Curiosamente, no hay ningún elemento que cumpla la segunda condición y solo uno satisface la primera. En otras palabras: el único candidato con posibilidades es el hidrógeno diatómico, del que aún no sabemos con seguridad si presenta transición a superfluido, salvo en condiciones muy extremas, como, por ejemplo, en forma de pequeñas gotas formadas por decenas de moléculas, o confinadas a superficies, estudiadas en simulaciones. Desde luego, lo que queda absolutamente descartado es la existencia de superfluidos de alta temperatura. A menos, claro está, que se formasen mediante un mecanismo absolutamente nuevo que aún no conocemos.

¿QUÉ ES UN SUPERSÓLIDO?

Cuando explicamos de forma sencilla la fase sólida solemos recurrir al ejemplo del cristal de esferas duras completamente empacadas. Este modelo, aunque dista de ser el único, retiene las propiedades más importantes de los sólidos y las hace más fáciles de comprender. Por ejemplo, nos permite visualizar con sencillez lo que llamamos «defectos» en una red (figura 1): un átomo fuera de su sitio o ausente, una fila de átomos desplazada en alguna dirección, un átomo de un elemento diferente, un electrón ocupando el lugar de un anión, una frontera entre zonas ordenadas de distinta manera... Estos defectos aparecen en todos los materiales y su número aumenta con la temperatura, haciendo que las redes cristalinas sean más quebradizas y llevándolas eventualmente hasta el estado líquido.

FIG. 1

ALGUNOS DEFECTOS EN REDES CRISTALINAS BIDIMENSIONALES



Para entender el origen de los defectos en la red, y con el objetivo de explicar con palabras llanas el mundo natural, podemos imaginar a los átomos como hipotéticos soldados en una formación. Solo que estos «soldados» han venido de una larga fiesta de graduación y no todos están tan sobrios y marciales como cabría esperar. Algunos se mueven algo nerviosos en su posición, otros apenas son capaces de recordar cuál es su sitio y los hay que siguen durmiendo en su cama, ajenos al toque de trompeta. En esta comparación, el alcohol ingerido juega el papel de la temperatura, mientras que la más que probable reprimenda posterior es, en cierto modo, la energía de enlace entre partículas. El alcohol-temperatura desordena a la tropa mientras que la reprimenda-energía tiende a mantenerla en su posición óptima. La entropía del desfile es una medida de los errores en la formación, y el científico, en este caso, es el sargento que va a dejar a sus muchachos al sol hasta que se les pasen por completo

los efectos etílicos. Bajo estas condiciones, lo habitual es que, poco a poco, los soldados vayan recuperándose y recolocándose correctamente, hasta llegar a un estado de perfecto orden, de mínima reprimenda-energía.

Como se desprende de esta analogía, cuando nos acercamos lentamente al cero absoluto de temperatura el número de defectos disminuye hasta desaparecer. No obstante, ¿qué pasa si no nos acercamos «lentamente» al cero absoluto? ¿Qué ocurre si, en vez de dejar a los soldados en la solana decidimos echarles agua por encima y espabilárlas de golpe? Lo que ocurrirá es que, aterrados, se quedarán en su sitio por miedo a llamar la atención, de modo que tendremos una formación prácticamente sobria pero terriblemente mal organizada. O, volviendo al caso del sólido cristalino: al enfriarlo de golpe se formará una red con tantos defectos como tenía inicialmente a mayor temperatura. Cuando esto ocurre se dice que tenemos un *estado subenfriado, metaestable*, que retiene características que no le son enteramente propias. Un ejemplo de esto es el vidrio, que se fabrica enfriando rápidamente sílice fundida, de modo que obtenemos un sólido rígido pero con la estructura microscópica desordenada de un líquido.

Pero ¿por qué nos hemos parado a explicar con tanto detalle cómo se forman los defectos? La respuesta hay que buscarla en un artículo de finales de los años setenta en el que dos físicos, el ruso Alexander Andreev (n. 1939) y el ucraniano Ilya Lifshitz (1917-1982), este último coautor habitual del laureado físico y matemático ruso Lev Landau (1908-1968), propusieron un extraño estado que podía surgir en una red donde hubiera suficientes átomos vacantes a temperaturas suficientemente bajas. Su idea era que, en un sólido formado por bosones, cada vacante se comportaría, matemáticamente hablando, como una partícula bosónica que se desplazase libremente por la red. Así, los huecos de la red serían una especie de fluido de bosones que, a temperaturas suficientemente bajas, bien podría sufrir una transición de fase convirtiéndose en un condensado de Bose-Einstein. Si: una transición de fase protagonizada por partículas virtuales (ausentes), por partículas que no estaban allí. Una transición de fase que nos llevaría a una especie de estado superfluido sólido —de

ahí el término *supersólido*—. La idea era tan maravillosa que habría sido una pena que no fuese cierta.

Lamentablemente, los primeros experimentos y las simulaciones por ordenador que se realizaron en años posteriores mostraron que, al menos en el helio, esta fase supersólida no aparecía.

El número de vacantes en la red era demasiado pequeño a las temperaturas que exigían la transición de Bose-Einstein y, por tanto, esta no podía ocurrir. Recientemente, sin embargo, se han realizado experimentos donde sí se encuentran indicios de fase supersólida, aunque bien es cierto que los resultados parecen depender fuertemente de cada tipo de configuración experimental elegida.

Más concretamente: la fase supersólida no aparece en los cristales de helio «demasiado buenos» sino en aquellos donde hay claras fronteras de grano, zonas desordenadas donde el cristal cambia de orientación, o interfase entre líquido y sólido. Es decir, el supersólido aparece solo cuando hay zonas donde se acumulan de forma anormal los defectos de la red y es la existencia de esas zonas la que permite el flujo superfluido de partículas. De cualquier modo, la prueba más importante en contra del mecanismo propuesto por Andreev y Lifshitz proviene de las exquisitas medidas de la capacidad calorífica realizadas por el equipo del físico estadounidense Moses Hung-Wai Chan (n. 1946) de la Universidad Estatal de Pensilvania, Estados Unidos, donde no se observa el comportamiento analítico que debería tener bajo una transición de fase de segundo orden como la predicha. El supersólido, si existe, no es como lo habíamos imaginado.

Bose y Einstein desencadenaron experimentos a baja temperatura que condujeron al descubrimiento de una nueva materia. A ellos les debo mi trabajo y el Nobel.

WOLFGANG KETTERLE

¿ES EL VACÍO UN SUPERFLUIDO?

Aunque nos gusta pensar que la ciencia avanza de forma sólida, impasible e infalible, dibujando una línea recta que empieza en los matemáticos griegos o tal vez en los egipcios y que continúa

hasta el día de hoy, la realidad, bien documentada por el físico e historiador Thomas Kuhn en el libro *La estructura de las revoluciones científicas*, es que, en ocasiones, los avances se producen mediante saltos que rompen con los paradigmas establecidos. En alguno de estos casos, no siempre, se abandona para siempre algún ilustre cadáver de la generación precedente. De todos ellos mencionaremos dos ejemplos muy conocidos, dos fluidos ya casi olvidados: el calórico y el éter. El primero sobrevive apenas como una analogía cuando queremos explicar el flujo de energía entre dos cuerpos a distinta temperatura: el calórico es como el río que baja de la montaña al mar, un «líquido energético» que se transmite de un cuerpo a otro, que «cae» de forma natural del más caluroso al más frío. El segundo, el éter, ha perdido del todo su sentido físico y ya solo se menciona en sentido metafórico.

El éter daba nombre a esa sustancia que lo impregnaba todo, un fluido intangible cuya única razón de ser es que servía de sostén a la radiación luminosa. Era el medio material que, se creía, necesitaba la luz para viajar por el espacio sideral y transmitirse. Así como el fluido calórico desapareció con las leyes de la termodinámica, el éter recibió la puñalada más letal del célebre físico alemán Albert Einstein (1879-1955). Aunque el experimento llevado a cabo en 1887 por los físicos Albert A. Michelson y Edward W. Morley ya probó que el éter no existía, fue la llegada de la teoría de la relatividad especial la que realmente dejó obsoleto aquel concepto. Desde entonces, y ha pasado ya más de un siglo, hemos aceptado con naturalidad que estamos rodeados de espacio vacío, que la luz de las estrellas viaja hasta nosotros atravesando la nada más absoluta, y que, dejando aparte algún átomo ocasional de hidrógeno, no hay nada «ahí fuera». Hoy, mencionar el éter en un contexto serio equivale a comprar un billete —solo de ida— hacia el ridículo intelectual.

Y sin embargo... sin embargo el vacío está lleno de partículas. No solo las del polvo interestelar o las de los rayos cósmicos, tampoco las formadas por esos fotones casi infinitos que cruzan el vacío yendo en todas direcciones. Este, como demuestran las leyes de la física, está lleno de partículas virtuales que se crean y se destruyen continuamente, siguiendo el ritmo que marcan la

ley de conservación de la energía y el principio de incertidumbre de Heisenberg. El procedimiento es bien conocido. En un punto del espacio se produce una repentina fluctuación energética que origina una partícula y su antipartícula (por ejemplo, un electrón y un positrón). Luego, estas partículas vuelan y el positrón, antes o después, encuentra un electrón, colisiona y ambos se desintegran, liberando la energía que anteriormente les había prestado el universo. Este proceso ocurre continuamente en todo el cosmos y da lugar a partículas que viven apenas un instante prestado. La energía se mantiene constante a medio y largo plazo, pero es bien cierto que, durante un tiempo infinitesimal, hay más de la que debería. Se viola el principio de conservación de la energía aunque siguiendo una restricción: el producto de esa «energía prestada» durante el tiempo que dura la violación es siempre menor que la constante de Planck, dividida entre cuatro veces el número pi. Esta restricción garantiza que no se cree materia de la nada. Cuanto mayor sea la energía, tanto menor será el tiempo y viceversa.

El problema de este concepto de «vacío-llego-de-partículas» es que su energía promedio debe ser distinta de cero. Por tanto, debería aparecer en las ecuaciones de la relatividad general de Einstein (a través de lo que llamamos *constante cosmológica*, representada por el símbolo Lambda, Λ) y tener un efecto medible en sus soluciones. El vacío no es irrelevante en la evolución del universo. Ahora bien, ya que el vacío no carece estrictamente de partículas, debe de tener algún tipo de estructura. ¿Es un gas? ¿Es un sólido? ¿Un fluido? ¿Tiene acaso sentido plantear la naturaleza del vacío en términos de estados de la materia? ¿No sería un poco como volver al siglo xix y sacar el éter del viejo baúl de los trastos? Algunos físicos no solo creen que tiene sentido, sino que además han aventurado una respuesta a su naturaleza: no es que el universo esté impregnado de un fluido etéreo sino que es el propio tejido del espacio-tiempo el que se comporta como un fluido. Más aún, han calculado a qué velocidad viaja la radiación por el cosmos y han encontrado que es independiente de la frecuencia, lo que indicaría que el espacio-tiempo es un fluido de viscosidad nula. Es decir: un superfluido.

Estas conclusiones, altamente especulativas, dejan en el aire más preguntas que respuestas. Por ejemplo: ¿en qué sentido es un fluido el espacio-tiempo? ¿Está formado por cuantos que se deslizan unos sobre otros? ¿Qué significa exactamente la viscosidad en este contexto? ¿Y cómo podría medirse, en caso de no ser nula? Si la velocidad de la radiación pudiera depender de esta viscosidad, ¿significaría ello que podría violarse la ley de transformación de velocidades de Lorentz, publicada por el físico neerlandés Hendrik Antoon Lorentz en 1904? ¿Dejaría de ser válida la relatividad especial con la formulación matemática que conocemos? ¿Qué pasaría con la relatividad general? O bien: ¿de verdad pueden sacarse conclusiones del hecho de que la luz viaje siempre a la misma velocidad? ¿No era este uno de los resultados experimentales más importantes de la historia? ¿Qué aporta exactamente la teoría del espacio-tiempo superfluido a la física? ¿Qué predicciones hace? ¿Qué caminos de investigación abre? Algunos opinan que esta concepción del espacio-tiempo podría ayudar a compaginar de forma definitiva la teoría relativista con la mecánica cuántica. El italiano Stefano Liberati, físico líder de esta teoría y profesor en la Escuela Internacional Superior de Estudios Avanzados de Trieste, en Italia, apunta que, quizás, no sea necesario cuantificar la gravedad sino el propio espacio-tiempo. Puede que las teorías supersimétricas y las teorías de cuerdas sean simples *culs-de-sac* de la física, meros entretenimientos matemáticos. La pregunta se repite: ¿Qué nuevos fenómenos predice realmente la Teoría del Vacío Superfluido (SVT, por *Superfluid Vacuum Theory*)? ¿A qué necesidades responde?

SUPERCONDUCTORES A PRESIONES REALMENTE ALTAS

Estamos tan acostumbrados a trabajar bajo los parámetros de la presión atmosférica que, muchas veces, pasamos por alto cuánto pueden llegar a variar las propiedades de los materiales cuando se ven sometidos a muy altas o muy bajas presiones. Igual que se puede forzar un cambio de estado modificando la temperatu-

ra, también podemos lograrlo variando la presión mientras mantenemos la temperatura constante. Si tenemos un material encerrado bajo un pistón y lo comprimimos, su densidad subirá, de modo que el sistema se adaptará buscando el estado más estable a esta nueva densidad. Si luego retiramos el pistón y dejamos que el material se expanda, ocurrirá justo lo contrario. Los sólidos, por ejemplo, subliman cuando son sometidos a muy baja presión. La mayoría de líquidos, por su parte, se convierten en sólidos cuando aumentamos lo suficiente la presión sobre ellos —ya que los sólidos suelen ser más densos que los líquidos—. Sin embargo, la influencia ejercida por la presión se había pasado por alto durante las primeras décadas de experimentación con superconductores. Esto pudo ocurrir, en parte, porque es difícil trabajar en un laboratorio con condiciones extremas. Bajar la presión a una centésima o una milésima parte de la presión atmosférica no supone un desafío tecnológico (¡basta con hacer vacío!) pero si necesitamos someter un material a una presión de cientos o miles de atmósferas (¡sin romperlo!) entonces es necesario realizar un montaje experimental muy complejo, delicado y cuidadoso.

Debido a este inconveniente, el estudio de los superconductores a alta presión se apoya muy fuertemente en simulaciones por ordenador que, normalmente, guían y anticipan las medidas experimentales directas que puedan hacerse. Pero... ¿realmente ocurren cosas interesantes a alta presión o todas estas elucubraciones se quedarán en agua de borrajas?

El primer científico que se planteó esta cuestión fue el británico Neil Ashcroft en 1968. Su hipótesis postulaba que el hidrógeno molecular, sometido a presiones suficientemente altas, podría comportarse como un superconductor de Tipo I a temperaturas del orden de 100 K. Desafortunadamente, para que el hidrógeno se mantuviera sólido a temperaturas tan altas, la presión debía superar los cuatro millones de atmósferas, algo que en aquel momento era imposible de lograr en el laboratorio o de estudiar siquiera con un ordenador de la época. Esto, sin duda, ralentizó la investigación dirigida a los superconductores de alta presión.

Material	Temperatura crítica en kelvin/ presión en gigapascales	Referencia
H ₂ Br	10 K a 240 GPa	Duan <i>et al.</i> , arXiv:1504.01196
PtH	16 K a 100 GPa	Szczesniak-Zemla, arXiv:1504.01349
H ₃ I	13,7 K a 150 GPa	Shamp & Zurek, J. Phys. Chem. B, 119, 4067 (2015)
HSe	39 K a 250 GPa	Zhang <i>et al.</i> , arXiv:1502.02607
PoH ₃	41,1 K a 200 GPa	Liu <i>et al.</i> , 1503.08587
GeH ₄ (H ₂) ₂	80 K a 250 GPa	J. Phys. Chem. C 116, 5225 (2012)
GaH ₃	80 K a 160 GPa	Gao <i>et al.</i> , PRB 84, 064111 (2011)
SiH ₄ (H ₂) ₂	100 K a 250 GPa	Li <i>et al.</i> , PNAS 107, 15708 (2010)
H ₄ Te	104 K a 170 GPa	Zhong <i>et al.</i> , arXiv: 1503.00396
H ₃ Se	116 K a 200 GPa	Zhang <i>et al.</i> , arXiv:1502.02607
GeH ₃	140 K a 180 GPa	Abe & Ashcroft, PRB 88, 174110 (2013)
H ₃ O _{0.5} S _{0.5}	164 K	Heil-Boeri, Phys. Rev. B 92, 060508 (2015)
CaH ₆	235 K a 150 GPa	Wang <i>et al.</i> , PNAS 109, 6463 (2012)

Décadas más tarde, el mismo Ashcroft propuso que algunos compuestos del hidrógeno (en la tabla, posibles hidruros superconductores) también podían comportarse como superconductores de alta temperatura si eran sometidos a presiones superiores al millón de atmósferas. Esta interesante idea espoletó el estudio mediante simulaciones —ahora ya posibles gracias al avance de las ciencias de la computación— de compuestos como el sulfuro de hidrógeno, el cual resultó cumplir las predicciones de Ashcroft: a poco más de un millón y medio de atmósferas y 80 K de temperatura la simulación de sulfuro de hidrógeno (H₂S) se comportaba como un superconductor. ¿El paso siguiente? Comprobar experimentalmente estos resultados.

Efectivamente, en 2014, en Alemania, el equipo del físico experimental bielorruso Mikhail Eremets (n. 1949) conseguía poner una pequeña cantidad de sulfuro de hidrógeno a la presión necesaria para comprobar los resultados avanzados por las simulaciones por ordenador. Los números no solo cuadran sino que mejoraban las predicciones más optimistas: ¡el H₂S se comportaba como superconductor hasta alcanzar la friolera de 203 K! ¡Casi

200 K por encima de aquel primer superconductor que Kamerlingh Onnes había hallado un siglo antes! El sueño de obtener una temperatura ambiente estaba más cerca que nunca... ¡Aunque a cambio de tener que trabajar a presiones que reventarían el aceite! Es como si la naturaleza nos hiciera jugar siempre con naipes marcados. En cualquier caso, los superconductores de alta temperatura son una realidad más inminente (y cálida) que nunca.

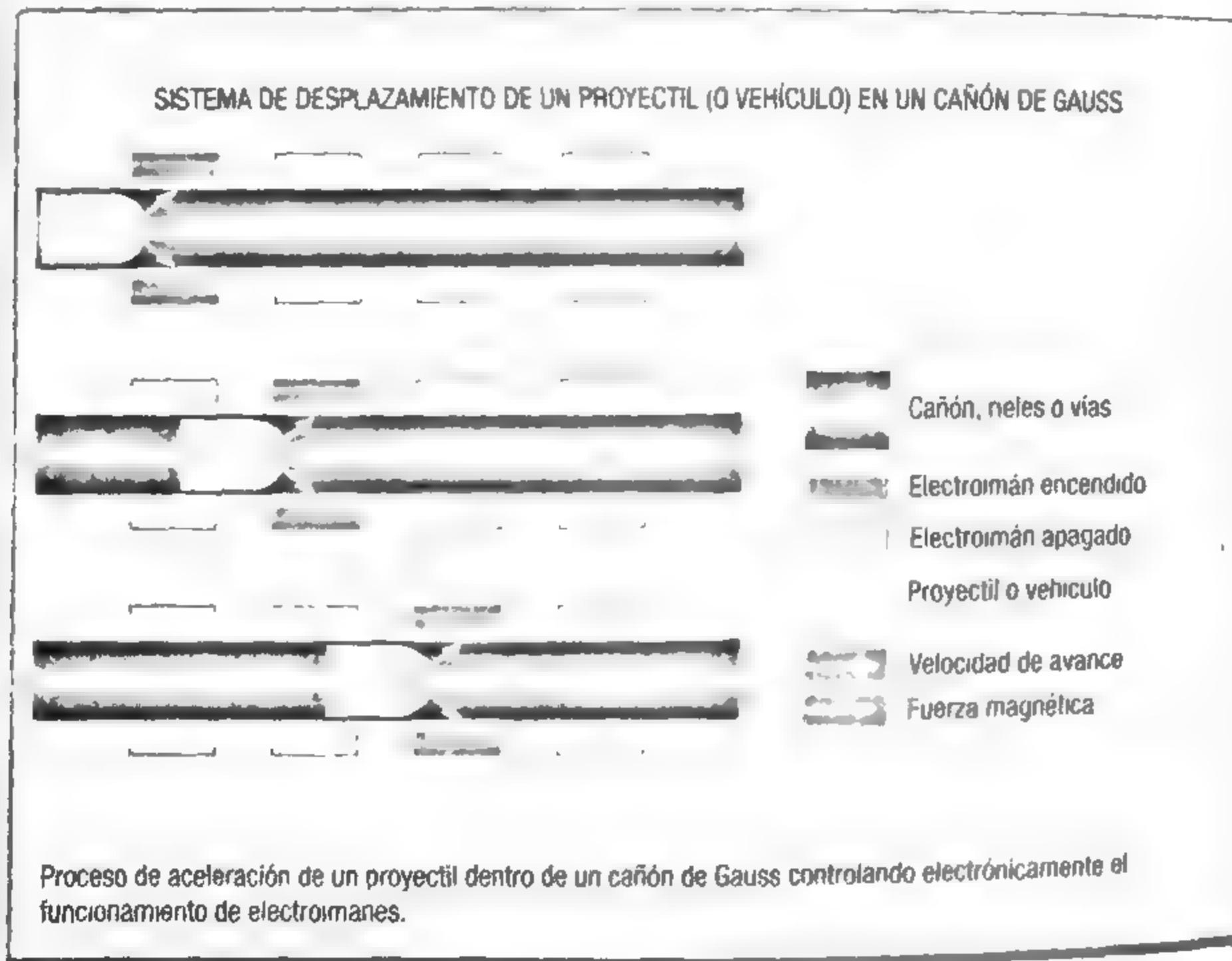
LA TECNOLOGÍA DEL PRESENTE Y DEL FUTURO

Todos los fenómenos que hemos visto hasta ahora están relacionados en mayor o menor medida con tres ideas fundamentales. Una, la física de bajas temperaturas. Dos, la aparición de comportamientos cuánticos a escala macroscópica. Tres, la formación de condensados de Bose-Einstein en sistemas completamente diferentes. Pero, aunque está fuera de duda la importancia de investigar el comportamiento fundamental de la naturaleza, se da la paradoja de que estos estudios tan aparentemente abstractos darán lugar a nuevos materiales, aplicaciones y tecnologías increíblemente avanzadas. Algunos materiales, como es el caso de los superconductores de baja temperatura, llevan ya décadas formando parte de nuestros aceleradores de partículas y aparatos de resonancia magnética nuclear. En general, allí donde se necesite un campo magnético importante aparecerá casi siempre un material superconductor como componente imprescindible de un potente electroimán. Un superconductor que, además, estará refrigerado por helio líquido a 4 K, un elemento que conocemos, probablemente, mejor que cualquier otro.

Pero aunque los superconductores ya estén entre nosotros, aún queda mucho margen de desarrollo. Ya hemos hablado tanto de la existencia de los superconductores de alta temperatura como de los que funcionan a alta presión y, sin embargo, nos ha quedado la sensación, el regusto amargo, de que aún estamos lejos de nuestro objetivo: conseguir un material superconductor que funcione, si no en condiciones normales de presión y temperatura, sí con valores razonablemente cercanos a ellos.

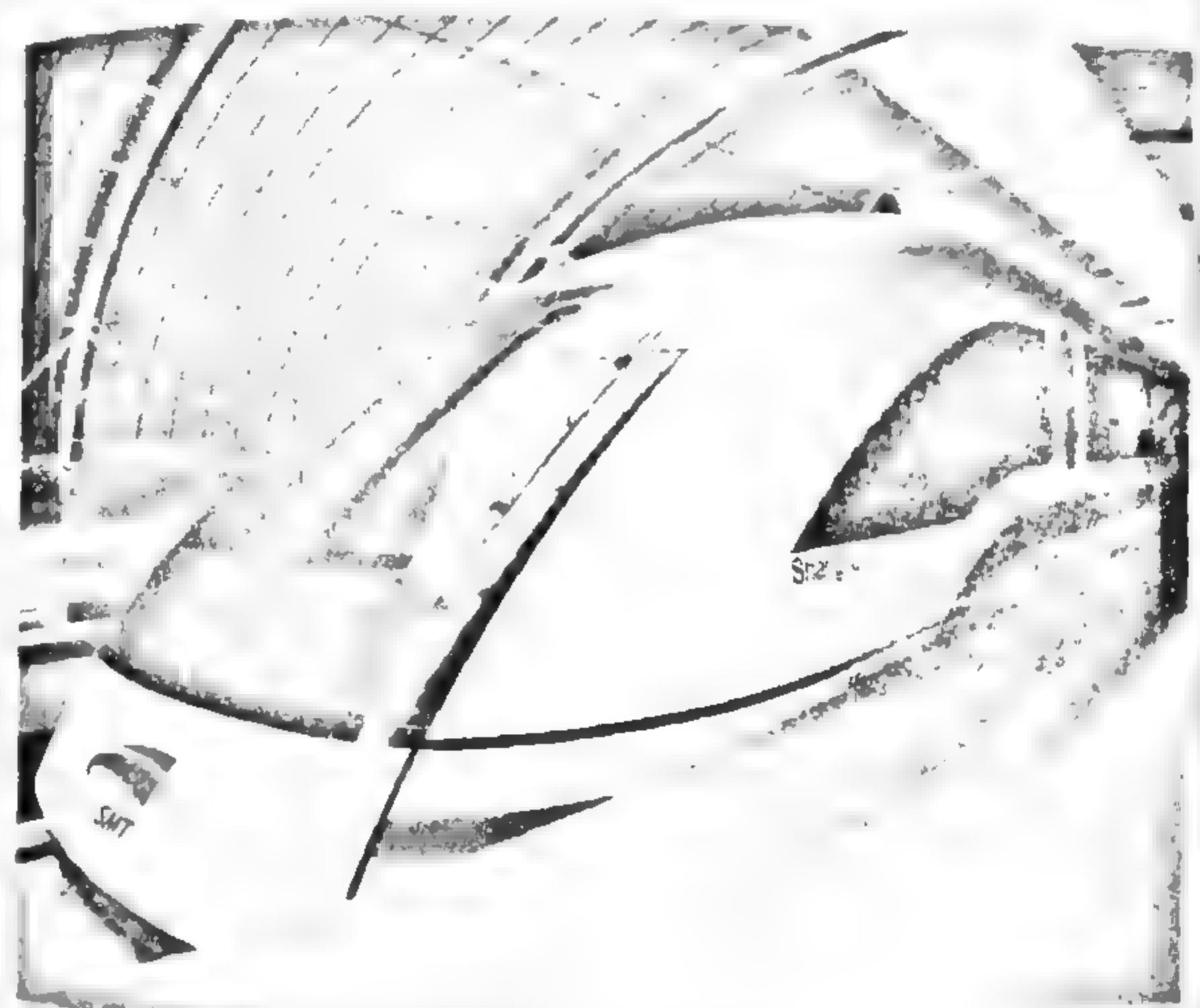
EL CAÑÓN DE GAUSS: GENERANDO VELOCIDAD

Dentro de las aplicaciones más pintorescas de los campos magnéticos hay una que potencialmente es más conocida dentro del ámbito de la ficción científica que en el que realmente le corresponde: la tecnología militar. Esto es debido a que su desarrollo no presenta ventajas claras frente a otros dispositivos que disparan proyectiles. El diseño más sencillo de un cañón de Gauss tiene solo dos partes importantes y reconocibles. La primera es un cañón que puede ser bien un tubo o bien el típico cilindro hueco por el que viajaría el proyectil. Alrededor de este cañón se disponen una serie de electroimanes (ver figura inferior), cuyo funcionamiento se controla electrónicamente de modo que cuando se encienden los pares, los impares están apagados y viceversa. Imaginemos que tenemos un proyectil ferromagnético en la parte más profunda del cañón. Tras activar el electroimán 1, el proyectil avanzaría a lo largo del cañón hasta llegar con cierta velocidad a la posición del mismo. En ese momento se apaga el electroimán 1 y se enciende el 2, que aceleraría aún más al proyectil. Cuando este llegase al centro del electroimán 2, este se apagara y se encendería el 3. Este mismo proceso se repetiría a lo largo de todos los electroimanes situados a lo largo del cañón, de modo que el proyectil iría ganando cada vez más velocidad, hasta que echase a volar fuera del cañón.



Campos magnéticos para el transporte urbano?

Ya hemos considerado la posibilidad de usar un diseño similar para desplazar, ya no un proyectil, sino un vehículo de transporte, como por ejemplo un tren. De hecho el tren magnético ya existe (ver imagen), aunque el desafío tecnológico que requiere es enorme: potentes imanes, vías específicas altamente sofisticadas y un software capaz de ajustar los tiempos de encendido de cada electroimán, para asegurar que ese modo de transporte sea estable y seguro. La belleza de la idea es que los mismos electroimanes que producen el desplazamiento del tren son usados a la vez para sostener el vehículo de modo que es un mismo dispositivo el que controla todo el movimiento del tren. ¿No parece ciencia ficción? ¿Podría emplearse algo semejante en automóviles de conducción manual? ¿Y en motocicletas o tablas de skate? Probablemente el futuro nos gane por la mano con alguna idea muchísimo más atrevida que estas. Siempre lo hace.



A pesar de que ya en 1971 se presentó en Múnich, Alemania, el primer tren experimental de suspensión magnética, el Transrapid, a día de hoy el tren Shanghai Maglev es la única línea comercial de alta velocidad de levitación magnética existente.

Imaginemos por un instante que ya hubiéramos conseguido el sueño de todos los investigadores en superconductividad de alta temperatura: comprender los efectos de la red cristalina en los superconductores de Tipo II y, gracias a ello, diseñar a la carta un óxido metálico que se convierta en superconductor a 22 °C, o lo que es lo mismo, 295 K. ¿Y ahora qué? El primer paso sería implementar nuestro descubrimiento en todas aquellas aplicaciones en las que ahora usamos otros «viejos» superconductores. Eso nos libraría automáticamente de incómodos y caros sistemas de refrigeración. Para mantener una temperatura de 295 K nos bastaría con usar agua fresca, del grifo sin ir más lejos.

Más que un intérprete, un científico que abraza un nuevo paradigma es como un hombre que usa lentes inversas.

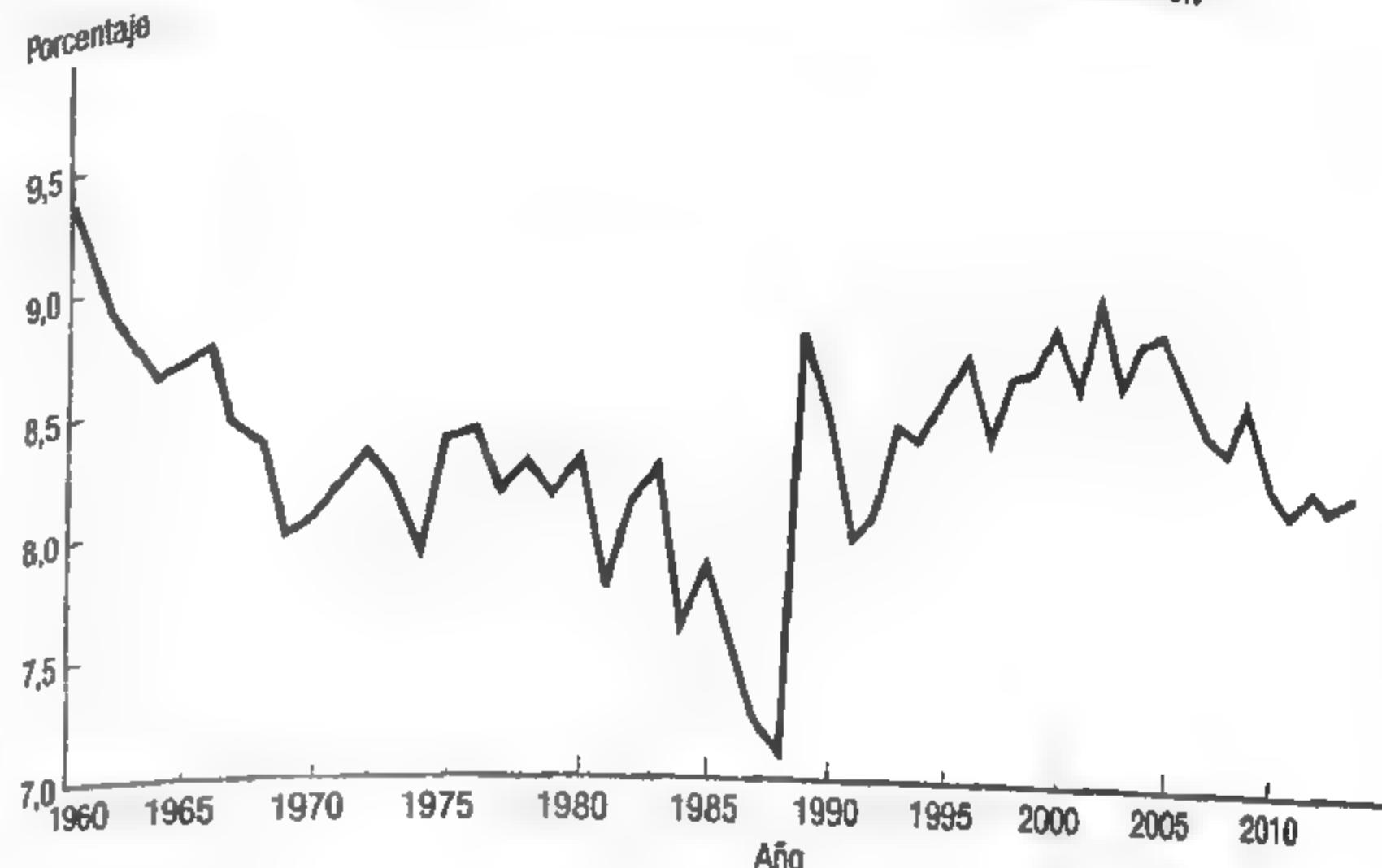
THOMAS KUHN

Mas no podemos quedarnos ahí. Ahora necesitamos dar un salto al vacío y pensar qué dispositivos o nuevos artilugios podrían beneficiarse de tener campos magnéticos de varios teslas. Por ejemplo, se podrían diseñar sujetaciones magnéticas seguras para usarlas en las estaciones espaciales o bien crear cañones de Gauss de alta potencia. Quizá también podrían construirse carreteras ferromagnéticas y construir vehículos que volasen a baja altura sobre ellas. De hecho, con la combinación de estas dos ideas nació el tren de levitación y propulsión magnética, un medio de transporte futurista para unir nuestras principales ciudades de forma ecológica y veloz. Un tren, no obstante, que se resiste a tomar el relevo del tren convencional debido a que precisa de una altísima inversión inicial, tanto tecnológica como en las infraestructuras necesarias asociadas.

¿Y si obtuviésemos un material superconductor con la ductilidad —y el precio— del cobre? Sería absurdo no cambiar todo nuestro cableado por este nuevo material. Las pérdidas de energía en el transporte de electricidad desaparecerían por completo (figura 2) ¡Sería alrededor de un 8% de ahorro en total!

Otro ejemplo: en el espacio, el 98% de la radiación cósmica consta de protones, los cuales, al tener carga positiva, son susceptibles de ser desviados o detenidos por los campos magnéti-

AG. 2
TRANSMISIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA Y PÉRDIDAS EN LA DISTRIBUCIÓN



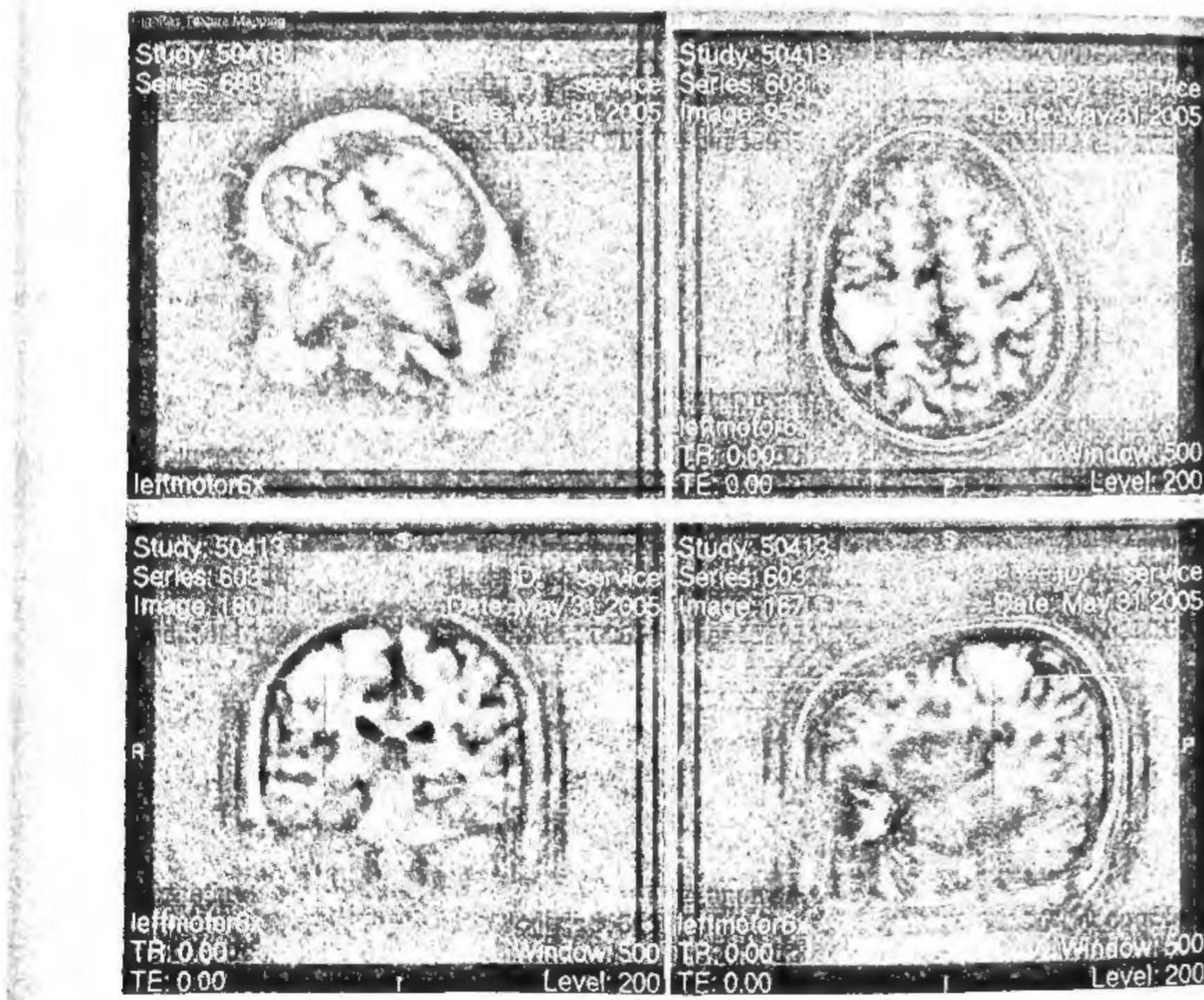
Con los materiales usados en la actualidad en el cableado eléctrico, las pérdidas energéticas durante el proceso de transporte de la electricidad alcanzan, de media, un 8%. La figura muestra la variación de esa tasa entre los años 1960 y 2010.

cos. Si dispusiésemos de superconductores, se podrían generar potentes campos exteriores a las naves espaciales para reconducir estas partículas hacia zonas donde no pudieran causar daño a la tripulación. La lista de posibles aplicaciones de los superconductores es interminable y solo está limitada por la tecnología y, sobre todo, por la imaginación.

En cuanto a los superfluidos, la cuestión es mucho más peligrosa. Cuando discutimos el caso del helio ya vimos que nuestras esperanzas de obtener otros líquidos similares eran, como poco, escasas. Solo el helio parece presentar una fase superfluida. Sin embargo, nada nos impide especular con la posibilidad de hallar en el futuro un compuesto con propiedades, si no idénticas, sí similares. En ese caso la pregunta que debemos hacernos sería: ¿qué ventajas tecnológicas podríamos obtener de un líquido que

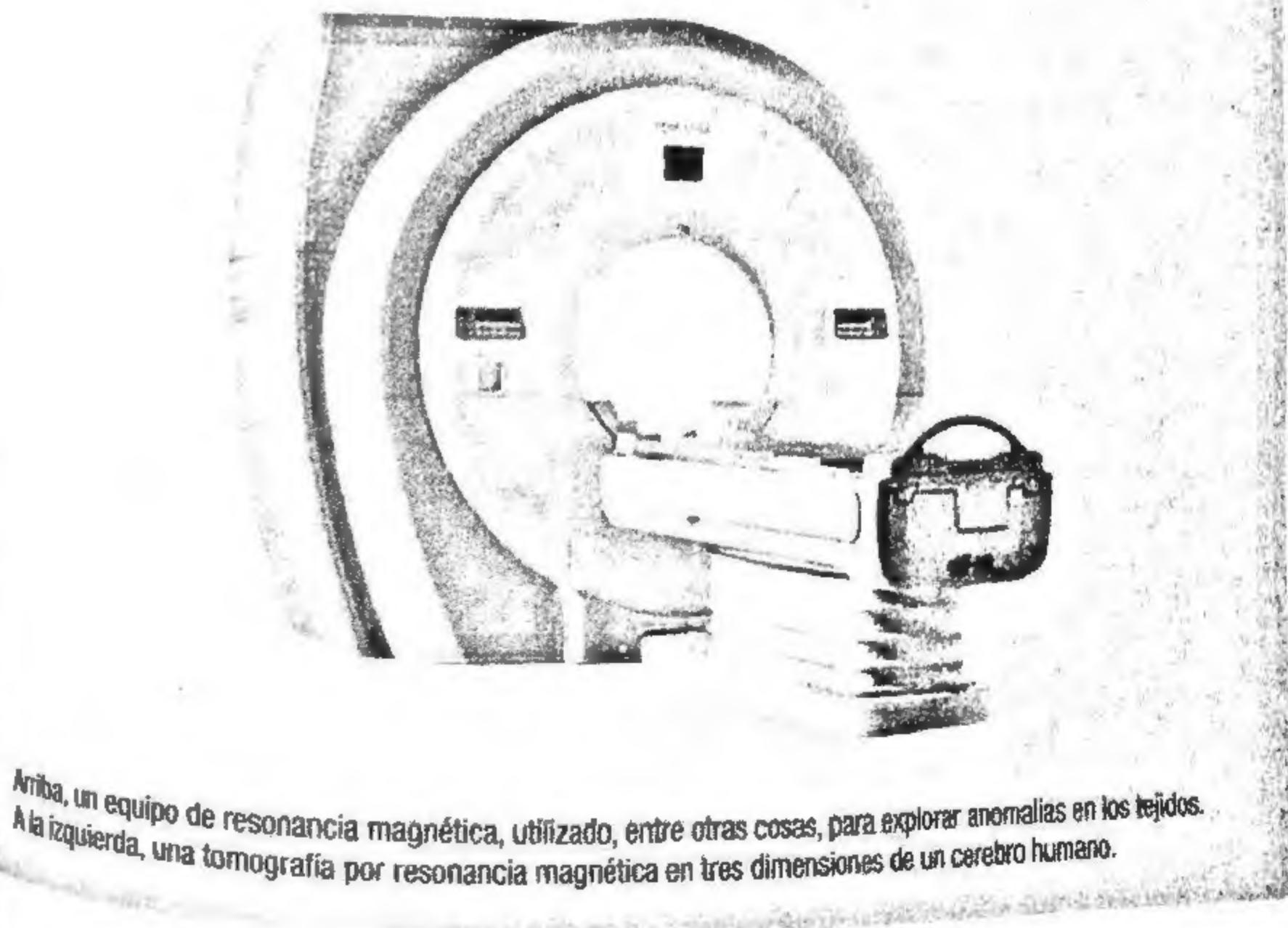
IMANES SUPERCONDUCTORES EN TOMOGRAFÍA POR RESONANCIA MAGNÉTICA

La mayoría de las empresas no acaban de entender que apostar por la ciencia básica es un imperativo de nuestras sociedades modernas. La razón de su desconfianza es por otra parte comprensible. Casi nunca se puede adivinar en qué campo encontrará aplicación un descubrimiento. En el campo de la resonancia magnética nuclear, por ejemplo, se conoce que los núcleos atómicos se comportan como pequeños imanes, lo que hace posible plantearse cómo conseguir que se alineen en una determinada dirección, o cómo invertir la dirección en la que apuntan cual pequeñas brújulas. Sabida la diferencia de energía entre los distintos estados del espín nuclear, como si de una peonza se tratara, se puede lanzar radiación a los núcleos y observar cómo a ciertas frecuencias se produce más o menos absorción de energía. Si la frecuencia que enviamos se corresponde con el salto entre dos niveles de energía nuclear, entonces algunos de los fotones radiados serán absorbidos y, más adelante, reemitidos. Así, estudiando cómo es la absorción y reemisión de la radiación, podemos estudiar el espectro de energías de una muestra. Este espectro depende de la sustancia y también, en menor medida, de su entorno, lo que nos permite caracterizar distintos compuestos moleculares.



Radiación canalizada a través de anillos de corriente

Por otro lado, gracias a los materiales superconductores podemos crear, siempre que trabajemos a temperaturas cercanas al cero absoluto, anillos de corriente que circulen generando sin disipar campos magnéticos extremadamente potentes, normalmente de algunos teslas (lo más común en los equipos españoles es que sean de 1,5 o 3 T), unidad que es decenas de miles de veces mayor que el valor del campo magnético terrestre. Si unimos estos dos descubrimientos, ¿qué tenemos? Pues, aunque parezca increíble, uno de los instrumentos de diagnóstico más precisos y menos invasivos que existen. La Tomografía por Resonancia Magnética, TRM, (no la confundamos con la Tomografía Axial Computerizada, TAC, que utiliza rayos X), hoy presente en multitud de hospitales. Consta de un imán superconductor enfriado con helio líquido a unos 4 kelvin, generadores y receptores de radiofrecuencia, además de un potente sistema informático que analiza cómo el cuerpo del paciente responde a los campos electromagnéticos de baja frecuencia a los que está sometido (en la fotografía, un equipo de resonancia magnética). La grandeza de la resonancia magnética nuclear es que permite diferenciar los distintos tejidos según su respuesta. Luego el ordenador reconstruye tridimensionalmente el interior del paciente (ver muestra de TRM en la imagen), lo que es usado prolídicamente en diagnóstico, especialmente cuando interesa investigar tejidos blandos que no se aprecian bien mediante una TAC o un PET (en castellano, Tomografía por Emisión de Positrones) o cuando la salud del paciente no permite estos medios, que pueden ser dañinos en ciertos casos.



Arriba, un equipo de resonancia magnética, utilizado, entre otras cosas, para explorar anomalías en los tejidos. A la izquierda, una tomografía por resonancia magnética en tres dimensiones de un cerebro humano.

carece de viscosidad y cuya conductividad térmica es infinita? ¿Sería demasiado mundano emplearlo como lubricante? ¿Podría combinarse con unas aletas y diseñar un traje similar al que de hecho usan los astronautas, rodeado de tubos llenos con material superfluido que absorbería y redirigiera perfectamente hacia fuera el calor circundante? ¿Serviría como protección térmica en ambientes hostiles, como los existentes en unos altos hornos o en la superficie de Mercurio? O, pensando específicamente en el helio, ¿es su bajo módulo de compresibilidad un indicativo de que podríamos usarlo para absorber impactos?

Como siempre, al final el futuro nos cogerá desprevenidos con una nueva idea revolucionaria, un hallazgo afortunado, una aplicación genial o un desarrollo teórico sobresaliente. Aunque siempre es bueno conocer las limitaciones que nos impone la tecnología, no hay que perder de vista que, muchas veces, esos límites son temporales y que pueden caer en cualquier momento. Hubo un tiempo en el que se pensaba que los aviones jamás sobrepasarían la velocidad del sonido, que los átomos eran indivisibles o que los espectros de emisión y absorción de los elementos eran un puro galimatías sin pies ni cabeza. Hay que dar tiempo al tiempo y no dejar de jugar nunca con las ideas que nos pasan por la cabeza: por extravagantes e irreales que parezcan nunca se sabe cuál de ellas va a abrir una puerta a lo imposible. La naturaleza, sin embargo, siempre tiene la última palabra.

BLUNDELL, S.J., *Superconductivity: a very short introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2009.

BORJA, E.F., *Entropía, la reina del desorden*, «Descubrir la Ciencia», Materia (El País) 2016.

COX, B. y FORSHAW, J. *El universo cuántico*, Debate, 2014.

EDELMAN, V., *Cerca del cero absoluto*, Moscú, Editorial Mir, 1986.

JOU, D., *Introducción al mundo cuántico*, Barcelona, Pasado y Presente, 2013.

KAKU, M., *Física de lo imposible*, Debolsillo, 2010.

MAGAÑA SOLÍS, L.F., *Los superconductores*, Fondo de Cultura Económica, México, 2012.

MAYO, J., *Superconductividad: el umbral de una nueva tecnología*, McGraw-Hill, 1996.

PENROSE, R., *El camino a la realidad: Una guía completa de las Leyes del Universo*, Debate, 2015.

VIDAL, G., *Superconductivity: the next revolution?*, Cambridge, Cambridge University Press, 1993.

agua 8, 15, 16, 18, 22, 32, 35, 37-40, 42, 43, 47, 49, 53, 55, 66, 67, 72, 84-88, 92, 95, 104, 121, 122, 126, 138, 143, 148
aislante de Mott 94
Allen, John F. 9, 51, 69
Andreev, Alexander 138, 139
Ashcroft, Neil 143, 144
átomo 9, 10, 18, 25, 26, 38, 40, 41, 49, 50, 54, 61, 62, 64-69, 71, 72, 74-76, 78, 85, 90, 92-94, 100, 101, 110, 114, 118-121, 124, 126, 134-138, 140, 152
Bardeen, John 7, 9, 76, 77, 114
Bednorz, Georg 28, 30-32
Bell, Jocelyn 127
bits 109, 110, 112
Bose, Satyendra 7, 59
bosón 9, 54, 62-66, 68, 70-73, 75, 79, 93, 94, 114, 133, 134, 138
calor 17, 18, 20, 21, 23, 38, 39, 51, 56, 70, 86, 92, 152
campo eléctrico 29, 112
campo magnético 27-30, 84, 94, 96, 97, 99, 100, 102-104, 111-113, 115, 118, 119, 145-148, 151
cañón de Gauss 146
carga del electrón 99
CERN 63, 101
Chan, Moses Hung-Wai 139
código binario 109
condensado de Bose-Einstein 7, 64-71, 75, 79, 93, 94, 119, 120, 124, 125, 133, 135, 138
conductividad 10, 16, 20, 21, 25, 27-30, 51, 56, 76, 95, 103, 121, 152
constante cosmológica 141
constante de Boltzmann 22
constante de Planck 99, 141
Cooper, Leon N. 9, 76, 77
Cornell, Eric A. 69, 119, 120, 135

Indo 24, 39, 79, 94, 95
ion 101, 114
Josephson, Bruce 111, 114
Kapitza, Pyotr 7, 9, 51, 66
Kavetski 22, 32, 50, 55, 57, 91, 93
101, 127, 128, 144, 151
Kawasaki, Wolfgang 16, 112, 121
125, 130
Keller, Thomas 140, 145

Kleemann, Barbara Wagner
Lacoste 5
Lamkin, Robert 16, 114
Laporte de Montrond 116
Liberman, Stefano 142
Lissauer, Lynn 136, 138
Ljungdahl 17, 21, 31, 36-51, 60-63
55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63
64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72
73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81
82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90
91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99
100, 101, 102, 103, 104, 105, 106
107, 108, 109, 110, 111, 112, 113
114, 115, 116, 117, 118, 119, 120
121, 122, 123, 124, 125, 126, 127
128, 129, 130, 131, 132, 133, 134
135, 136, 137, 138, 139, 140
141, 142, 143, 144, 145, 146, 147
148, 149, 150, 151, 152, 153, 154
155, 156, 157, 158, 159, 160, 161
162, 163, 164, 165, 166, 167, 168
169, 170, 171, 172, 173, 174, 175
176, 177, 178, 179, 180, 181, 182
183, 184, 185, 186, 187, 188, 189
189, 190, 191, 192, 193, 194, 195
196, 197, 198, 199, 200, 201, 202
203, 204, 205, 206, 207, 208, 209
209, 210, 211, 212, 213, 214, 215
216, 217, 218, 219, 220, 221, 222
223, 224, 225, 226, 227, 228, 229
229, 230, 231, 232, 233, 234, 235
235, 236, 237, 238, 239, 240, 241
241, 242, 243, 244, 245, 246, 247
247, 248, 249, 250, 251, 252, 253
253, 254, 255, 256, 257, 258, 259
259, 260, 261, 262, 263, 264, 265
265, 266, 267, 268, 269, 270, 271
271, 272, 273, 274, 275, 276, 277
277, 278, 279, 280, 281, 282, 283
283, 284, 285, 286, 287, 288, 289
289, 290, 291, 292, 293, 294, 295
295, 296, 297, 298, 299, 300, 301
301, 302, 303, 304, 305, 306, 307
307, 308, 309, 310, 311, 312, 313
313, 314, 315, 316, 317, 318, 319
319, 320, 321, 322, 323, 324, 325
325, 326, 327, 328, 329, 330, 331
331, 332, 333, 334, 335, 336, 337
337, 338, 339, 340, 341, 342, 343
343, 344, 345, 346, 347, 348, 349
349, 350, 351, 352, 353, 354, 355
355, 356, 357, 358, 359, 360, 361
361, 362, 363, 364, 365, 366, 367
367, 368, 369, 370, 371, 372, 373
373, 374, 375, 376, 377, 378, 379
379, 380, 381, 382, 383, 384, 385
385, 386, 387, 388, 389, 390, 391
391, 392, 393, 394, 395, 396, 397
397, 398, 399, 400, 401, 402, 403
403, 404, 405, 406, 407, 408, 409
409, 410, 411, 412, 413, 414, 415
415, 416, 417, 418, 419, 420, 421
421, 422, 423, 424, 425, 426, 427
427, 428, 429, 430, 431, 432, 433
433, 434, 435, 436, 437, 438, 439
439, 440, 441, 442, 443, 444, 445
445, 446, 447, 448, 449, 450, 451
451, 452, 453, 454, 455, 456, 457
457, 458, 459, 460, 461, 462, 463
463, 464, 465, 466, 467, 468, 469
469, 470, 471, 472, 473, 474, 475
475, 476, 477, 478, 479, 480, 481
481, 482, 483, 484, 485, 486, 487
487, 488, 489, 490, 491, 492, 493
493, 494, 495, 496, 497, 498, 499
499, 500, 501, 502, 503, 504, 505
505, 506, 507, 508, 509, 510, 511
511, 512, 513, 514, 515, 516, 517
517, 518, 519, 520, 521, 522, 523
523, 524, 525, 526, 527, 528, 529
529, 530, 531, 532, 533, 534, 535
535, 536, 537, 538, 539, 540, 541
541, 542, 543, 544, 545, 546, 547
547, 548, 549, 550, 551, 552, 553
553, 554, 555, 556, 557, 558, 559
559, 560, 561, 562, 563, 564, 565
565, 566, 567, 568, 569, 570, 571
571, 572, 573, 574, 575, 576, 577
577, 578, 579, 580, 581, 582, 583
583, 584, 585, 586, 587, 588, 589
589, 590, 591, 592, 593, 594, 595
595, 596, 597, 598, 599, 600, 601
601, 602, 603, 604, 605, 606, 607
607, 608, 609, 610, 611, 612, 613
613, 614, 615, 616, 617, 618, 619
619, 620, 621, 622, 623, 624, 625
625, 626, 627, 628, 629, 630, 631
631, 632, 633, 634, 635, 636, 637
637, 638, 639, 640, 641, 642, 643
643, 644, 645, 646, 647, 648, 649
649, 650, 651, 652, 653, 654, 655
655, 656, 657, 658, 659, 660, 661
661, 662, 663, 664, 665, 666, 667
667, 668, 669, 670, 671, 672, 673
673, 674, 675, 676, 677, 678, 679
679, 680, 681, 682, 683, 684, 685
685, 686, 687, 688, 689, 690, 691
691, 692, 693, 694, 695, 696, 697
697, 698, 699, 700, 701, 702, 703
703, 704, 705, 706, 707, 708, 709
709, 710, 711, 712, 713, 714, 715
715, 716, 717, 718, 719, 720, 721
721, 722, 723, 724, 725, 726, 727
727, 728, 729, 730, 731, 732, 733
733, 734, 735, 736, 737, 738, 739
739, 740, 741, 742, 743, 744, 745
745, 746, 747, 748, 749, 750, 751
751, 752, 753, 754, 755, 756, 757
757, 758, 759, 760, 761, 762, 763
763, 764, 765, 766, 767, 768, 769
769, 770, 771, 772, 773, 774, 775
775, 776, 777, 778, 779, 779, 780
780, 781, 782, 783, 784, 785, 786
786, 787, 788, 789, 789, 790, 791
791, 792, 793, 794, 795, 796, 797
797, 798, 799, 800, 801, 802, 803
803, 804, 805, 806, 807, 808, 809
809, 810, 811, 812, 813, 814, 815
815, 816, 817, 818, 819, 820, 821
821, 822, 823, 824, 825, 826, 827
827, 828, 829, 830, 831, 832, 833
833, 834, 835, 836, 837, 838, 839
839, 840, 841, 842, 843, 844, 845
845, 846, 847, 848, 849, 850, 851
851, 852, 853, 854, 855, 856, 857
857, 858, 859, 860, 861, 862, 863
863, 864, 865, 866, 867, 868, 869
869, 870, 871, 872, 873, 874, 875
875, 876, 877, 878, 879, 880, 881
881, 882, 883, 884, 885, 886, 887
887, 888, 889, 889, 890, 891, 892
892, 893, 894, 895, 896, 897, 898
898, 899, 900, 901, 902, 903, 904
904, 905, 906, 907, 908, 909, 910
910, 911, 912, 913, 914, 915, 916
916, 917, 918, 919, 920, 921, 922
922, 923, 924, 925, 926, 927, 928
928, 929, 930, 931, 932, 933, 934
934, 935, 936, 937, 938, 939, 940
940, 941, 942, 943, 944, 945, 946
946, 947, 948, 949, 950, 951, 952
952, 953, 954, 955, 956, 957, 958
958, 959, 960, 961, 962, 963, 964
964, 965, 966, 967, 968, 969, 970
970, 971, 972, 973, 974, 975, 976
976, 977, 978, 979, 980, 981, 982
982, 983, 984, 985, 986, 987, 988
988, 989, 990, 991, 992, 993, 994
994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000
1000, 1001, 1002, 1003, 1004, 1005
1005, 1006, 1007, 1008, 1009, 1009, 1010
1010, 1011, 1012, 1013, 1014, 1015, 1016
1016, 1017, 1018, 1019, 1019, 1020, 1021
1021, 1022, 1023, 1024, 1025, 1026, 1027
1027, 1028, 1029, 1029, 1030, 1031, 1032
1032, 1033, 1034, 1035, 1036, 1037, 1038
1038, 1039, 1040, 1041, 1042, 1043, 1044
1044, 1045, 1046, 1047, 1048, 1049, 1050
1050, 1051, 1052, 1053, 1054, 1055, 1056
1056, 1057, 1058, 1059, 1059, 1060, 1061
1061, 1062, 1063, 1064, 1065, 1066, 1067
1067, 1068, 1069, 1069, 1070, 1071, 1072
1072, 1073, 1074, 1075, 1076, 1077, 1078
1078, 1079, 1080, 1081, 1082, 1083, 1084
1084, 1085, 1086, 1087, 1088, 1089, 1090
1090, 1091, 1092, 1093, 1094, 1095, 1096
1096, 1097, 1098, 1099, 1099, 1100, 1101
1101, 1102, 1103, 1104, 1105, 1106, 1107
1107, 1108, 1109, 1109, 1110, 1111, 1112
1112, 1113, 1114, 1115, 1115, 1116, 1117
1117, 1118, 1119, 1119, 1120, 1121, 1122
1122, 1123, 1124, 1124, 1125, 1126, 1127
1127, 1128, 1129, 1129, 1130, 1131, 1132
1132, 1133, 1134, 1134, 1135, 1136, 1137
1137, 1138, 1139, 1139, 1140, 1141, 1142
1142, 1143, 1144, 1144, 1145, 1146, 1147
1147, 1148, 1149, 1149, 1150, 1151, 1152
1152, 1153, 1154, 1154, 1155, 1156, 1157
1157, 1158, 1159, 1159, 1160, 1161, 1162
1162, 1163, 1164, 1164, 1165, 1166, 1167
1167, 1168, 1169, 1169, 1170, 1171, 1172
1172, 1173, 1174, 1174, 1175, 1176, 1177
1177, 1178, 1179, 1179, 1180, 1181, 1182
1182, 1183, 1184, 1184, 1185, 1186, 1187
1187, 1188, 1189, 1189, 1190, 1191, 1192
1192, 1193, 1194, 1194, 1195, 1196, 1197
1197, 1198, 1199, 1199, 1200, 1201, 1202
1202, 1203, 1204, 1204, 1205, 1206, 1207
1207, 1208, 1209, 1209, 1210, 1211, 1212
1212, 1213, 1214, 1214, 1215, 1216, 1217
1217, 1218, 1219, 1219, 1220, 1221, 1222
1222, 1223, 1224, 1224, 1225, 1226, 1227
1227, 1228, 1229, 1229, 1230, 1231, 1232
1232, 1233, 1234, 1234, 1235, 1236, 1237
1237, 1238, 1239, 1239, 1240, 1241, 1242
1242, 1243, 1244, 1244, 1245, 1246, 1247
1247, 1248, 1249, 1249, 1250, 1251, 1252
1252, 1253, 1254, 1254, 1255, 1256, 1257
1257, 1258, 1259, 1259, 1260, 1261, 1262
1262, 1263, 1264, 1264, 1265, 1266, 1267
1267, 1268, 1269, 1269, 1270, 1271, 1272
1272, 1273, 1274, 1274, 1275, 1276, 1277
1277, 1278, 1279, 1279, 1280, 1281, 1282
1282, 1283, 1284, 1284, 1285, 1286, 1287
1287, 1288, 1289, 1289, 1290, 1291, 1292
1292, 1293, 1294, 1294, 1295, 1296, 1297
1297, 1298, 1299, 1299, 1300, 1301, 1302
1302, 1303, 1304, 1304, 1305, 1306, 1307
1307, 1308, 1309, 1309, 1310, 1311, 1312
1312, 1313, 1314, 1314, 1315, 1316, 1317
1317, 1318, 1319, 1319, 1320, 1321, 1322
1322, 1323, 1324, 1324, 1325, 1326, 1327
1327, 1328, 1329, 1329, 1330, 1331, 1332
1332, 1333, 1334, 1334, 1335, 1336, 1337
1337, 1338, 1339, 1339, 1340, 1341, 1342
1342, 1343, 1344, 1344, 1345, 1346, 1347
1347, 1348, 1349, 1349, 1350, 1351, 1352
1352, 1353, 1354, 1354, 1355, 1356, 1357
1357, 1358, 1359, 1359, 1360, 1361, 1362
1362, 1363, 1364, 1364, 1365, 1366, 1367
1367, 1368, 1369, 1369, 1370, 1371, 1372
1372, 1373, 1374, 1374, 1375, 1376, 1377
1377, 1378, 1379, 1379, 1380, 1381, 1382
1382, 1383, 1384, 1384, 1385, 1386, 1387
1387, 1388, 1389, 1389, 1390, 1391, 1392
1392, 1393, 1394, 1394, 1395, 1396, 1397
1397, 1398, 1399, 1399, 1400, 1401, 1402
1402, 1403, 1404, 1404, 1405, 1406, 1407
1407, 1408, 1409, 1409, 1410, 1411, 1412
1412, 1413, 1414, 1414, 1415, 1416, 1417
1417, 1418, 1419, 1419, 1420, 1421, 1422
1422, 1423, 1424, 1424, 1425, 1426, 1427
1427, 1428, 1429, 1429, 1430, 1431, 1432
1432, 1433, 1434, 1434, 1435, 1436, 1437
1437, 1438, 1439, 1439, 1440, 1441, 1442
1442, 1443, 1444, 1444, 1445, 1446, 1447
1447, 1448, 1449, 1449, 1450, 1451, 1452
1452, 1453, 1454, 1454, 1455, 1456, 1457
1457, 1458, 1459, 1459, 1460, 1461, 1462
1462, 1463, 1464, 1464, 1465, 1466, 1467
1467, 1468, 1469, 1469, 1470, 1471, 1472
1472, 1473, 1474, 1474, 1475, 1476, 1477
1477, 1478, 1479, 1479, 1480, 1481, 1482
1482, 1483, 1484, 1484, 1485, 1486, 1487
1487, 1488, 1489, 1489, 1490, 1491, 1492
1492, 1493, 1494, 1494, 1495, 1496, 1497
1497, 1498, 1499, 1499, 1500, 1501, 1502
1502, 1503, 1504, 1504, 1505, 1506, 1507
1507, 1508, 1509, 1509, 1510, 1511, 1512
1512, 1513, 1514, 1514, 1515, 1516, 1517
1517, 1518, 1519, 1519, 1520, 1521, 1522
1522, 1523, 1524, 1524, 1525, 1526, 1527
1527, 1528, 1529, 1529, 1530, 1531, 1532
1532, 1533, 1534, 1534, 1535, 1536, 1537
1537, 1538, 1539, 1539, 1540, 1541, 1542
1542, 1543, 1544, 1544, 1545, 1546, 1547
1547, 1548, 1549, 1549, 1550, 1551, 1552
1552, 1553, 1554, 1554, 1555, 1556, 1557
1557, 1558, 1559, 1559, 1560, 1561, 1562
1562, 1563, 1564, 1564, 1565, 1566, 1567
1567, 1568, 1569, 1569, 1570, 1571, 1572
1572, 1573, 1574, 1574, 1575, 1576, 1577
1577, 1578, 1579, 1579, 1580, 1581, 1582
1582, 1583, 1584, 1584, 1585, 1586, 1587
1587, 1588, 1589, 1589, 1590, 1591, 1592
1592, 1593, 1594, 1594, 1595, 1596, 1597
1597, 1598, 1599, 1599, 1600, 1601, 1602
1602, 1603, 1604, 1604, 1605, 1606, 1607
1607, 1608, 1609, 1609, 1610, 1611, 1612
1612, 1613, 1614, 1614, 1615, 1616, 1617
1617, 1618, 1619, 1619, 1620, 1621, 1622
1622, 1623, 1624, 1624, 1625, 1626, 1627
1627, 1628, 1629, 1629, 1630, 1631, 1632
1632, 1633, 1634, 1634, 1635, 1636, 1637
1637, 1638, 1639, 1639, 1640, 1641, 1642
1642, 1643, 1644, 1644, 1645, 1646, 1647
1647, 1648, 1649, 1649, 1650, 1651, 1652
1652, 1653, 1654, 1654, 1655, 1656, 1657
1657, 1658, 1659, 1659, 1660, 1661, 1662
1662, 1663, 1664, 1664, 1665, 1666, 1667
1667, 1668, 1669, 1669, 1670, 1671, 1672
1672, 1673, 1674, 1674, 1675, 1676, 1677
1677, 1678, 1679, 1679, 1680, 1681, 1682
1682, 1683, 1684, 1684, 1685, 1686, 1687
1687, 1688, 1689, 1689, 1690, 1691, 1692
1692, 1693, 1694, 1694, 1695, 1696, 1697
1697, 1698, 1699, 1699, 1700, 1701, 1702
1702, 1703, 1704, 1704, 1705, 1706, 1707
1707, 1708, 1709, 1709, 1710, 1711, 1712
1712, 1713, 1714, 1714, 1715, 1716, 1717
1717, 1718, 1719, 1719, 1720, 1721, 1722
1722, 1723, 1724, 1724, 1725, 1726, 1727
1727, 1728, 1729, 1729, 1730, 1731, 1732
1732, 1733, 1734, 1734, 1735, 1736, 1737
1737, 1738, 1739, 1739, 1740, 1741, 1742
1742, 1743, 1744, 1744, 1745, 1746, 1747
1747, 1748, 1749, 1749, 1750, 1751, 1752
1752, 1753, 1754, 1754, 1755, 1756, 1757
1757, 1758, 1759, 1759, 1760, 1761, 1762
1762, 1763, 1764, 1764, 1765, 1766, 1767
1767, 1768, 1769, 1769, 1770, 1771, 1772
1772, 1773, 1774, 1774, 1775, 1776, 1777
1777, 1778, 1779, 1779, 1780, 1781, 1782
1782, 1783, 1784, 1784, 1785, 1786, 1787
1787, 1788, 1789, 1789, 1790, 1791, 1792
1792, 1793, 1794, 1794, 1795, 1796, 1797
1797, 1798, 1799, 1799, 1800, 1801, 1802
1802, 1803, 1804, 1804, 1805, 1806, 1807
1807, 1808, 1809, 1809, 1810, 1811, 1812
1812, 18

134-146 121 122 123 124-125
148-151

Supervivencia de Epopeya
64 143

Supervivencia de Epopeya
34 124 145

Supervivencia 11 表現
第三章 72 73 74 75 76
124-125 126 127 128 129
141 142 143 144

Supervivencia 11 136 139

TAC 131

Temporada 19 11 12 13 14 15
16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 398 399 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 489 490 491 492 493 494 495 495 496 497 498 499 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 589 590 591 592 593 594 595 595 596 597 598 599 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 689 690 691 692 693 694 695 695 696 697 698 699 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 789 790 791 792 793 794 795 795 796 797 798 799 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 889 890 891 892 893 894 895 895 896 897 898 899 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 989 990 991 992 993 994 995 995 996 997 998 999 999 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1019 1020 1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1029 1030 1031 1032 1033 1034 1035 1036 1037 1038 1039 1039 1040 1041 1042 1043 1044 1045 1046 1047 1048 1049 1049 1050 1051 1052 1053 1054 1055 1056 1057 1058 1059 1059 1060 1061 1062 1063 1064 1065 1066 1067 1068 1069 1069 1070 1071 1072 1073 1074 1075 1076 1077 1078 1079 1079 1080 1081 1082 1083 1084 1085 1086 1087 1088 1089 1089 1090 1091 1092 1093 1094 1095 1095 1096 1097 1098 1099 1099 1100 1101 1102 1103 1104 1105 1106 1107 1108 1109 1109 1110 1111 1112 1113 1114 1115 1116 1117 1118 1119 1119 1120 1121 1122 1123 1124 1125 1126 1127 1128 1129 1129 1130 1131 1132 1133 1134 1135 1136 1137 1138 1139 1139 1140 1141 1142 1143 1144 1145 1146 1147 1148 1149 1149 1150 1151 1152 1153 1154 1155 1156 1157 1158 1159 1159 1160 1161 1162 1163 1164 1165 1166 1167 1168 1169 1169 1170 1171 1172 1173 1174 1175 1176 1177 1178 1178 1179 1180 1181 1182 1183 1184 1185 1186 1187 1188 1189 1189 1190 1191 1192 1193 1194 1195 1195 1196 1197 1198 1199 1199 1200 1201 1202 1203 1204 1205 1206 1207 1208 1209 1209 1210 1211 1212 1213 1214 1215 1216 1217 1218 1219 1219 1220 1221 1222 1223 1224 1225 1226 1227 1228 1229 1229 1230 1231 1232 1233 1234 1235 1236 1237 1238 1239 1239 1240 1241 1242 1243 1244 1245 1246 1247 1248 1249 1249 1250 1251 1252 1253 1254 1255 1256 1257 1258 1259 1259 1260 1261 1262 1263 1264 1265 1266 1267 1268 1269 1269 1270 1271 1272 1273 1274 1275 1276 1277 1278 1278 1279 1280 1281 1282 1283 1284 1285 1286 1287 1288 1289 1289 1290 1291 1292 1293 1294 1295 1295 1296 1297 1298 1299 1299 1300 1301 1302 1303 1304 1305 1306 1307 1308 1309 1309 1310 1311 1312 1313 1314 1315 1316 1317 1318 1319 1319 1320 1321 1322 1323 1324 1325 1326 1327 1328 1329 1329 1330 1331 1332 1333 1334 1335 1336 1337 1338 1339 1339 1340 1341 1342 1343 1344 1345 1346 1347 1348 1349 1349 1350 1351 1352 1353 1354 1355 1356 1357 1358 1359 1359 1360 1361 1362 1363 1364 1365 1366 1367 1368 1369 1369 1370 1371 1372 1373 1374 1375 1376 1377 1378 1378 1379 1380 1381 1382 1383 1384 1385 1386 1387 1388 1389 1389 1390 1391 1392 1393 1394 1395 1395 1396 1397 1398 1399 1399 1400 1401 1402 1403 1404 1405 1406 1407 1408 1409 1409 1410 1411 1412 1413 1414 1415 1416 1417 1418 1419 1419 1420 1421 1422 1423 1424 1425 1426 1427 1428 1429 1429 1430 1431 1432 1433 1434 1435 1436 1437 1438 1439 1439 1440 1441 1442 1443 1444 1445 1446 1447 1448 1449 1449 1450 1451 1452 1453 1454 1455 1456 1457 1458 1459 1459 1460 1461 1462 1463 1464 1465 1466 1467 1468 1469 1469 1470 1471 1472 1473 1474 1475 1476 1477 1478 1478 1479 1480 1481 1482 1483 1484 1485 1486 1487 1488 1489 1489 1490 1491 1492 1493 1494 1495 1495 1496 1497 1498 1499 1499 1500 1501 1502 1503 1504 1505 1506 1507 1508 1509 1509 1510 1511 1512 1513 1514 1515 1516 1517 1518 1519 1519 1520 1521 1522 1523 1524 1525 1526 1527 1528 1529 1529 1530 1531 1532 1533 1534 1535 1536 1537 1538 1539 1539 1540 1541 1542 1543 1544 1545 1546 1547 1548 1549 1549 1550 1551 1552 1553 1554 1555 1556 1557 1558 1559 1559 1560 1561 1562 1563 1564 1565 1566 1567 1568 1569 1569 1570 1571 1572 1573 1574 1575 1576 1577 1578 1578 1579 1580 1581 1582 1583 1584 1585 1586 1587 1588 1589 1589 1590 1591 1592 1593 1594 1595 1595 1596 1597 1598 1599 1599 1600 1601 1602 1603 1604 1605 1606 1607 1608 1609 1609 1610 1611 1612 1613 1614 1615 1616 1617 1618 1619 1619 1620 1621 1622 1623 1624 1625 1626 1627 1628 1629 1629 1630 1631 1632 1633 1634 1635 1636 1637 1638 1639 1639 1640 1641 1642 1643 1644 1645 1646 1647 1648 1649 1649 1650 1651 1652 1653 1654 1655 1656 1657 1658 1659 1659 1660 1661 1662 1663 1664 1665 1666 1667 1668 1669 1669 1670 1671 1672 1673 1674 1675 1676 1677 1678 1678 1679 1680 1681 1682 1683 1684 1685 1686 1687 1688 1689 1689 1690 1691 1692 1693 1694 1695 1695 1696 1697 1698 1699 1699 1700 1701 1702 1703 1704 1705 1706 1707 1708 1709 1709 1710 1711 1712 1713 1714 1715 1716 1717 1718 1719 1719 1720 1721 1722 1723 1724 1725 1726 1727 1728 1729 1729 1730 1731 1732 1733 1734 1735 1736 1737 1738 1739 1739 1740 1741 1742 1743 1744 1745 1746 1747 1748 1749 1749 1750 1751 1752 1753 1754 1755 1756 1757 1758 1759 1759 1760 1761 1762 1763 1764 1765 1766 1767 1768 1769 1769 1770 1771 1772 1773 1774 1775 1776 1777 1778 1778 1779 1780 1781 1782 1783 1784 1785 1786 1787 1788 1789 1789 1790 1791 1792 1793 1794 1795 1795 1796 1797 1798 1799 1799 1800 1801 1802 1803 1804 1805 1806 1807 1808 1809 1809 1810 1811 1812 1813 1814 1815 1816 1817 1818 1819 1819 1820 1821 1822 1823 1824 1825 1826 1827 1828 1829 1829 1830 1831 1832 1833 1834 1835 1836 1837 1838 1839 1839 1840 1841 1842 1843 1844 1845 1846 1847 1848 1849 1849 1850 1851 1852 1853 1854 1855 1856 1857 1858 1859 1859 1860 1861 1862 1863 1864 1865 1866 1867 1868 1869 1869 1870 1871 1872 1873 1874 1875 1876 1877 1878 1878 1879 1880 1881 1882 1883 1884 1885 1886 1887 1888 1889 1889 1890 1891 1892 1893 1894 1895 1895 1896 1897 1898 1899 1899 1900 1901 1902 1903 1904 1905 1906 1907 1908 1909 1909 1910 1911 1912 1913 1914 1915 1916 1917 1918 1919 1919 1920 1921 1922 1923 1924 1925 1926 1927 1928 1929 1929 1930 1931 1932 1933 1934 1935 1936 1937 1938 1939 1939 1940 1941 1942 1943 1944 1945 1946 1947 1948 1949 1949 1950 1951 1952 1953 1954 1955 1956 1957 1958 1959 1959 1960 1961 1962 1963 1964 1965 1966 1967 1968 1969 1969 1970 1971 1972 1973 1974 1975 1976 1977 1978 1978 1979 1980 1981 1982 1983 1984 1985 1986 1987 1988 1989 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1995 1996 1997 1998 1999 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2019 2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026 2027 2028 2029 2029 2030 2031 2032 2033 2034 2035 2036 2037 2038 2039 2039 2040 2041 2042 2043 2044 2045 2046 2047 2048 2049 2049 2050 2051 2052 2053 2054 2055 2056 2057 2058 2059 2059 2060 2061 2062 2063 2064 2065 2066 2067 2068 2069 2069 2070 2071 2072 2073 2074 2075 2076 2077 2078 2078 2079 2080 2081 2082 2083 2084 2085 2086 2087 2088 2089 2089 2090 2091 2092 2093 2094 2095 2095 2096 2097 2098 2099 2099 2100 2101 2102 2103 2104 2105 2106 2107 2108 2109 2109 2110 2111 2112 2113 2114 2115 2116 2117 2118 2119 2119 2120 2121 2122 2123 2124 2125 2126 2127 2128 2129 2129 2130 2131 2132 2133 2134 2135 2136 2137 2138 2139 2139 2140 2141 2142 2143 2144 2145 2146 2147 2148 2149 2149 2150 2151 2152 2153 2154 2155 2156 2157 2158 2159 2159 2160 2161 2162 2163 2164 2165 2166 2167 2168 2169 2169 2170 2171 2172 2173 2174 2175 2176 2177 2178 2178 2179 2180 2181 2182 2183 2184 2185 2186 2187 2188 2189 2189 2190 2191 2192 2193 2194 2195 2195 2196 2197 2198 2199 2199 2200 2201 2202 2203 2204 2205 2206 2207 2208 2209 2209 2210 2211 2212 2213 2214 2215 2216 2217 2218 2219 2219 2220 2221 2222 2223 2224 2225 2226 2227 2228 2229 2229 2230 2231 2232 2233 2234 2235 2236 2237 2238 2239 2239 2240 2241 2242 2243 2244 2245 2246 2247 2248 2249 2249 2250 2251 2252 2253 2254 2255 2256 2257 2258 2259 2259 2260 2261 2262 2263 2264 2265 2266 2267 2268 2269 2269 2270 2271 2272 2273 2274 2275 2276 2277 2278 2278 2279 2280 2281 2282 2283 2284 2285 2286 2287 2288 2289 2289 2290 2291 2292 2293 2294 2295 2295 2296 2297 2298 2299 2299 2300 2301 2302 2303 2304 2305 2306 2307 2308 2309 2309 2310 2311 2312 2313 2314 2315 2316 2317 2318 2319 2319 2320 2321 2322 2323 2324 2325 2326 2327 2328 2329 2329 2330 2331 2332 2333 2334 2335 2336 2337 2338 2339 2339 2340 2341 2342 2343 2344 2345 2346 2347 2348 2349 2349 2350 2351 2352 2353 2354 2355 2356 2357 2358 2359 2359 2360 2361 2362 2363 2364 2365 2366 2367 2368 2369 2369 2370 2371 2372 2373 2374 2375 2376 2377 2378 2378 2379 2380 2381 2382 2383 2384 2385 2386 2387 2388 2389 2389 2390 2391 2392 2393 2394 2395 2395 2396 2397 2398 2399 2399 2400 2401 2402 2403 2404 2405 2406 2407 2408 2409 2409 2410 2411 2412 2413 2414 2415 2416 2417 2418 2419 2419 2420 2421 2422 2423 24